

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Departamento de Transportes

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 28.1.04.03
Ass.: *Kauaflle*

**Comparação altimétrica entre pontos obtidos com
GPS RTK e Fotogrametria Digital**

Marisa Freitas Furtado

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – Área de Concentração – Transportes.

DEDALUS - Acervo - EESC



31100043058


Orientador: Prof. Dr. Irineu da Silva
São Carlos 2003



FOLHA DE JULGAMENTO

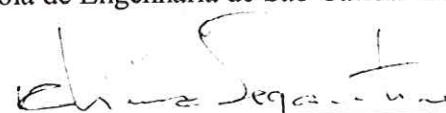
Candidata: Engenheira **MARISA FREITAS FURTADO**

Dissertação defendida e julgada em 27-02-2003 perante a Comissão Julgadora:




Prof. Dr. **IRINEU DA SILVA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado




Prof. Assoc. **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

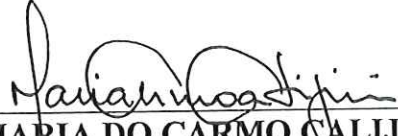


Prof. Dr. **SEGUNDO CARLOS LÓPES**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado



Prof. Assoc. **JOSE REYNALDO ANSELMO SETTI**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes



Prof. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

**A Deus
A minha família e
Ao meu namorado - Ronaldo**

AGRADECIMENTOS

Ao departamento de Transporte da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, pelo carinho e atenção de todos os funcionários e amigos.

Aos professores Dr. Ricardo Ernesto Schaal e Dr. Paulo Cezar Lima Segantine, pelo constante apoio para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao orientador Irineu da Silva, pela dedicação despendida para realização deste trabalho.

Ao CNPq, pela bolsa de estudo concedida, fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

A Instituição Unisinos, através dos professores Dr. Diego Alfonso Erba e Professor Ms. e doutorando Maurício Veronez, pelo apoio e incentivo a mim oferecidos

A empresa Comercial e Importadora Wild Ltda, pelo empréstimo dos equipamentos e softwares.

A amiga e colega Engenheira Ms. e doutoranda Simone Sayuri Sato, pelo apoio técnico indispensável para esclarecimentos de conceitos fundamentais para o embasamento científico deste trabalho.

Ao Paulinho, o técnico de topografia, pela disposição em ajudar na realização do levantamento topográfico de campo.

Aos colegas do “forninho”: Uchôa, Rodrigo, Tule e Genival pela alegria nos momentos de reflexão.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	I
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS	IV
LISTA DE ABREVIATURAS	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VI
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
INTRODUÇÃO	IX
OBJETIVO ESPECÍFICO	X
OBJETIVOS GERAIS	X
<u>CAPÍTULO 1</u>	<u>1</u>
SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL	1
1.1 – PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO GPS	1
<u>CAPÍTULO 2</u>	<u>7</u>
MODELO NUMÉRICO DO TERRENO (MNT)	7
2.1 – DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICA DO MNT	7
2.1.1 - MODELO DE GRADE REGULAR	8
2.1.2 - MODELO DE GRADE IRREGULAR	10
2.1.3 - ANÁLISES SOBRE MODELOS DIGITAIS DO TERRENO	11
<u>CAPÍTULO 3</u>	<u>12</u>
FOTOGRAMETRIA	12
3.1 – INTRODUÇÃO A FOTOGRAMETRIA	12
3.2 – FUNCIONAMENTO DA FOTOGRAMETRIA	13
3.3 – RESTITUIDORES	16
<u>CAPÍTULO 4</u>	<u>19</u>
FOTOGRAMETRIA DIGITAL	19
4.1 – INTRODUÇÃO	19
4.2 – FORMATO DA IMAGEM DIGITAL	20
4.3 – ACURÁCIA GEOMÉTRICA E RESOLUÇÃO ESPACIAL DA IMAGEM DIGITAL	21
4.4 – RESOLUÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS DIGITAIS	22
4.5 – CAPTAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS	23
4.6 – CORRELAÇÃO EM IMAGENS DIGITAIS	24
4.7 – PRECISÃO DE MAPEAMENTOS OBTIDOS A PARTIR DE IMAGENS DIGITAIS	26
<u>CAPÍTULO 5</u>	<u>27</u>
ORTOFOTO	27
5.1 – DEFINIÇÕES DE ORTOFOTO	27

5.2 - ORTOFOTO DIGITAL	28
5.3 - CUSTO E BENEFÍCIO DA ORTOFOTO DIGITAL	29
CAPÍTULO 6	34
EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA UTILIZADOS NESTE TRABALHO	34
6.1 - EQUIPAMENTOS	34
6.2 – METODOLOGIA	35
6.2.1 – ETAPAS PRELIMINARES PARA A REALIZAÇÃO DESTE TRABALHO	36
6.2.2 – ETAPA DO MÉTODO ESTÁTICO (ME)	37
6.2.3 – ETAPA DO MÉTODO CINEMÁTICO EM TEMPO REAL (MC)	39
6.2.4 – ETAPA NO RESTITUIDOR FOTOGRAMÉTRICO	41
CAPÍTULO 7	44
RESULTADOS	44
7.1 - INTRODUÇÃO	44
7.2 – RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO ESTÁTICO	44
7.3 – RESULTADOS OBTIDOS NO CAMPO COM O MÉTODO CINEMÁTICO RTK	47
7.4 – RESULTADOS OBTIDOS NO RESTITUIDOR FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL	48
7.5 – DIFICULDADES ENCONTRADAS NO LEVANTAMENTO DOS PONTOS DE CONTROLE	52
7.6 – OBSERVAÇÕES NO CAMPO COM O RECEPTOR GPS RTK	52
7.7 – DIFICULDADES ENCONTRADAS NO SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO	53
CAPÍTULO 8	54
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.	54
8.1– ANÁLISE DOS RESULTADOS	54
8.2- CONCLUSÕES OBTIDAS NESTE TRABALHO	55
8.3 – RECOMENDAÇÕES PARA REALIZAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS	56
ANEXOS	57
ANEXO A	57
RESUMO DAS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO GPS SR530 USADO NESTA PESQUISA	57
ANEXO B	58
ORTOFOTO DA ÁREA DE ESTUDO GERADA A PARTIR DE FOTOGRAFIAS NA ESCALA 1:8000, 23 CM X 23 CM	58
ANEXO C	59
DESCRIÇÃO DE ALGUNS PONTOS DE CONTROLE	59
BIBLIOGRAFIA	69
1- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
2- SITES CONSULTADOS	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema de posicionamento com GPS.....	1
Figura 1.2 – Receptor GPS Fixo	3
Figura 1.3 – Modelo do GPS 530.....	4
Figura 1.4 Esquema do funcionamento do GPS RTK	6
Figura 2.1 - Linha de drenagem (córrego).....	8
Figura 2.2 – Modelo de grade Regular.....	9
Figura 2.3 – Modelo de grade Irregular	10
Figura 3.1 – Orientação Relativa.....	15
Figura 3.2 – Orientação Absoluta	16
Figura 3.3 – Modelo de Estação de Trabalho.....	18
Figura 4.1 – Uma imagem Digital Esquemática	20
Figura 4.2 – Exemplo de matriz candidata	25
Figura 5.1 – Geometria de uma aerofotografia	28
Figura 5.2 – Ortofotos Digitais.....	31
Figura 6.1 – Área Piloto	37
Figura 6.2 – Controladora do Receptor SR 530 RTK	39
Figura 6.3 – Estação emissora do sinal GPS RTK	40
Figura 6.4 – Curvas de Nívelom o MNT editado	43
Figura 7.1 – Triangulação dos Pontos de Controle no Modelo Estereoscópico.....	46
Figura 7.2 – Finalidade da realização de Ortofotos.....	51

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Características dos Métodos de Reamostragem	9
TABELA 2 – Evolução da Fotogrametria	13
TABELA 3 – Tamanho do Pixel, número de pixels e quantidade de memória para uma imagem digital de uma fotografia aérea 9”X9”, baseada em imagens quantizadas em 256 níveis de cinza, sendo que, um pixel exige um byte.	22
TABELA 4 - Quantidade de dados conforme tamanho do pixel	32
TABELA 5 - Tamanho do arquivo em função da Resolução	32
TABELA 6 - Ampliação de uma fotografia para ortofoto	33
TABELA 7 – Características dos elipsóides WGS – 84 e o SAD - 69	38
TABELA 8 - Pontos de controle obtidos na Projeção UTM,	45
no sistema de Referência SAD-69	45
TABELA 9 – Levantamento com o sistema RTK	47
TABELA 10 – Comparação das alturas geométricas entre 20 pontos obtidos no restituidor fotogramétrico e o GPS RTK.....	49
TABELA 11 – Resultados obtidos por análise estatística no SOCET SET.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS

AT – Antena

CCD – Charge Coupled Devices (Dispositivo de Acoplamento de Cargas)

GPS - Global Positioning System – Sistema de Posicionamento Global

JPEG –Joint Photographic Experts Group

L₁ e L₂ – Ondas eletromagnéticas do sinal GPS

MNT – Modelo Numérico do Terreno

MC – Método Cinemático

ME – Método Estático

RGB – Red(vermelho), Green(verde), Blue(azul)

RTK – Posicionamento Relativo Cinemático em tempo real

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SR – Sensor GPS

UTM – Universal Transversa de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

ω (Ômega), φ (Phi), χ (Kappa) – Ângulos de Euler

$f(x, y)$ – Função contínua

Hz - Hertz

p/mm – Pares de linhas por milímetro

th – potência de 100

X, Y, Z – Coordenadas retificadas do terreno

X₀, Y₀, Z₀ – Coordenadas do ponto onde foi tomada a fotografia (centro de perspectiva)

X_g, Y_g, Z_g – Coordenadas de apoio terrestre

X_p, Y_p, Z_p – Coordenadas de imagem orientada

$\Delta x, \Delta y$ – Variável espacial conhecido como **sampling**

$\Delta \xi, \Delta \eta$ – Dimensões de cada pixel na fotografia

μm – Mícron

RESUMO

FURTADO, M. F. Comparação altimétrica entre pontos obtidos com GPS RTK e Fotogrametria Digital. São Carlos, 2003. 86 Páginas. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A obtenção de informações com qualidade sobre o nosso planeta vêm se tornando uma exigência cada vez maior. Tais informações devem apresentar um padrão mínimo de qualidade de acordo com as normas técnicas nacionais para que possam ser usadas para fins de: engenharia, cartografia, geoprocessamento e outros. Este trabalho traz subsídios para que os profissionais possam ter confiança na altimetria automática de sistemas fotogramétricos. Para isso, se realizou os Modelos Numéricos do Terreno (*MNTs*) com pontos gerados automaticamente pelo sistema fotogramétrico digital SOCET SET, comparado com os dados levantados no campo com o uso do sistema *GPS (Global Positioning System – Sistema de Posicionamento Global)* em Tempo Real. Essa comparação foi realizada por método estatístico interno ao sistema fotogramétrico SOCET SET e o erro padrão obtido ficou na ordem de 26 cm. A partir desse resultado, gerou-se como produto final uma ortofoto da região em estudo. A utilização da ortofoto deve-se às características de imagens exclusivas deste tipo de produto que equivale a um mapa de linha e permite ver exatamente o objeto-imagem e não símbolos representativos.

Palavras-chave: altura, imagem, sistema fotogramétrico, GPS, MNT.

ABSTRACT

FURTADO, M. F. *Comparison of height between points collected with the GPS RTK and Digital Photogrammetry*. São Carlos, 2003. 86 Pages. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Obtaining information with quality about our planet is becoming each time more necessary. These information must have at least the smallest standard quality according to the Brazilian rules about maps to that can be used in: engineering, cartography, data processing and others. This report deal with data to help professionals giving them confidence in the automatic geometric height of photogrammetric systems. Therefore Numeric Terrain Modeling were done with points generated automatically by digital photogrammetric system SOCET SET and compared with data collected in the field with the use of a GPS system (Global Positioning System) in Real Time. This comparison was realized by statistical method at SOCET SET photogrammetric system and the standard error obtained stayed in twenty-six centimeters. As a result, the use of orthophoto, is due to its characteristics of exclusive image of this type of product what means a line map and allow to see exactly the image of the object and not representative symbols.

Keywords: height, imagery, photogrammetric system, GPS, NTM.

INTRODUÇÃO

Os profissionais que trabalham com medições terrestres muitas vezes se questionam sobre a qualidade altimétrica da superfície do terreno. Essa qualidade depende do tipo de equipamento utilizado e do método de levantamento empregado. Entre eles pode-se citar duas novas tecnologias atualmente em uso: o levantamento cinemático em tempo real - RTK, que é a partir da tecnologia GPS e a geração automática de pontos, que é a partir do uso de recursos da Fotogrametria Digital.

A tecnologia GPS já está consagrada na área de levantamentos terrestres, pois, no decorrer dos anos, vem apresentando resultados cada vez melhores, enquanto que, a geração automática de pontos, a partir da Fotogrametria Digital, gera ainda muitos questionamentos, uma vez que, envolvem etapas de levantamento de campo para a orientação dos modelos estereoscópicos e a aplicação de algoritmos de correlação de imagens. Devido a esse desconhecimento sobre a precisão dos valores obtidos com a Fotogrametria Digital, decidiu-se realizar uma comparação entre os dados coletados em campo com o GPS RTK e os dados levantados automaticamente a partir da Fotogrametria Digital.

Os resultados dos experimentos apresentados nesta pesquisa mostram que os pontos gerados automaticamente podem ser considerados com qualidade suficiente, já que a posição espacial dos pontos medidos, a partir do algoritmo de correlação de imagens, mostrou-se coerente com os valores medidos diretamente no terreno. Essa constatação possibilita afirmar que os dados gerados automaticamente podem ser usados para fins topográficos. Também é possível extrair outros produtos digitais como modelos digitais do terreno e, a partir destes, construir ortofotos.

Para realização deste estudo foi necessário escolher uma área piloto que apresentasse as características físicas adequadas, são elas: o relevo do terreno com declividades acentuadas, a urbanização da área e outras relevâncias como rios e taludes. A área piloto escolhida foi na cidade de São Carlos, especificamente na Escola de Engenharia de São Carlos e bairros vizinhos.

OBJETIVO ESPECÍFICO

- ✓ O objetivo principal desse trabalho é comparar a altura geométrica¹ dos pontos levantados no campo com o GPS RTK e dos pontos obtidos automaticamente por processos fotogramétricos digitais e verificar se os resultados atingem as precisões de exatidão cartográfica.

OBJETIVOS GERAIS

- ✓ Resumir os conceitos fundamentais sobre GPS e Fotogrametria Digital;
- ✓ Apresentar os fundamentos para a compreensão sobre o GPS RTK;
- ✓ Elaborar alguns produtos digitais possíveis a partir dos dados automáticos obtidos por Fotogrametria Digital.

¹ Altura Geométrica: é altura calculada pelo receptor GPS em um elipsóide de referência.

CAPÍTULO 1

SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL

- Global Positioning System (GPS)

1.1 – Princípios de funcionamento do GPS

O GPS é um sistema de rádio-navegação completo que permite ao usuário saber a sua localização, sua velocidade, seu rumo e a hora exata com uma qualidade muito acima de qualquer sistema precursor. O vetor posição \mathbf{R} de um ponto no espaço é definido pela diferença entre o vetor posição \mathbf{r} do satélite e o vetor distância ρ que une o satélite ao ponto, que podem ser vistos na Figura 1.1.

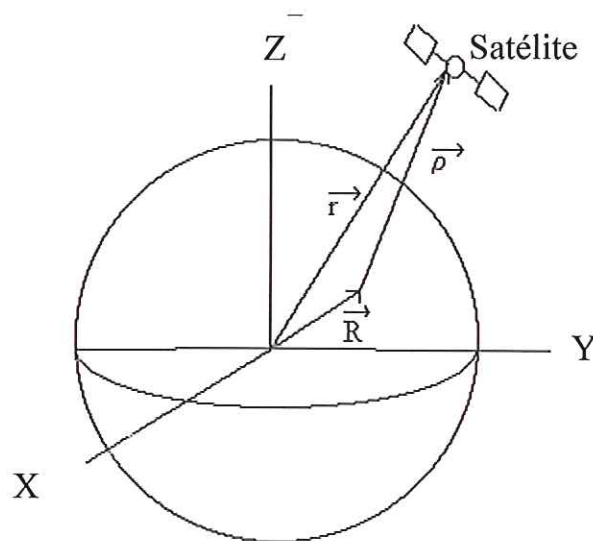


Figura 1.1 – Esquema de posicionamento com GPS

Para se determinar o vetor distância entre o satélite e a antena do usuário com precisão métrica é necessário manter a qualidade dos sinais transmitidos, a frequência da onda eletromagnética portadora das informações, que é estabilizada por padrão atômico as informações de órbitas dos satélites, tempo, correções de propagação. Com estas

especificações foi possível desenvolver métodos matemáticos e estatísticos, envolvendo diferenças vetoriais, que permitem a obtenção de um vetor, que une os centros de fase de duas antenas, com precisão milimétrica. (HOFFMANN-WELLENHOF 2001). No sistema cartesiano tri-dimensional o módulo deste vetor é definido por 3 diferenças escalares obtidas dos vetores posição das antenas. Dessa forma se o vetor posição de uma das antenas é conhecido, é possível determinar a posição da segunda antena relativa à primeira. Esse método de determinação da posição é conhecido como: Posicionamento Relativo. Normalmente uma das antenas permanece estacionada em um ponto de coordenadas conhecidas que definem o vetor posição, denominado ANTENA, BASE ou REFERÊNCIA e a outra antena, denominado MÓVEL ou ROVER. Esta última pode permanecer estacionada (Método Estático - ME) ou se deslocando (Método Cinemático - MC) durante o período de coleta de dados. O tempo de coleta de dados para a obtenção do vetor diferença vai depender do desvio padrão estabelecido pelo usuário, da distância entre as antenas, da distribuição espacial dos satélites e das condições da atmosfera.

Na realização deste trabalho foi utilizado o ME para a obtenção dos pontos de controle fotogramétricos que são para a orientação dos modelos estereoscópicos. A estação de referência está instalada sobre a caixa d'água do Departamento de Transportes da *EEESC-USP* (vide figura 1.2) objetivando-se evitar obstruções e também porque esse local possui as suas coordenadas conhecidas. Maiores esclarecimentos da antena fixa estão no capítulo 6 (Equipamentos e Metodologia Utilizados neste Trabalho).

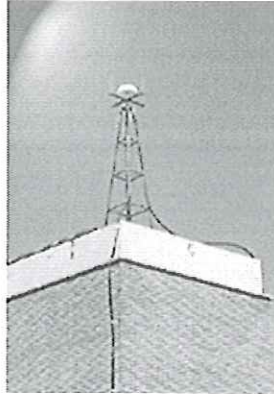


Figura 1.2 – Receptor GPS Fixo

A determinação das posições dos pontos no campo foi obtida utilizando o método cinemático com um equipamento provido de rádio-enlace entre a antena BASE e a antena ROVER. Com este enlace a coordenada do ponto ROVER é calculada em tempo real. A posição do ponto ROVER foi determinada a cada décimo de segundo. Esta técnica é denominada de Real Time Kinematic - RTK

Segundo LEICK (1995) apud TALBOT (1993), o ME, com as observações da fase da portadora em conjunto com a técnica da resolução do método da dupla diferença dos ciclos de onda entre satélites e as antenas de BASE e ROVER, resulta em aplicações de alta precisão, em milímetros.

Com o posicionamento RTK é possível obter precisão centimétrica, tornando-se possível comparar os dados levantados no campo com os pontos gerados automaticamente no sistema fotogramétrico.

Embora o método de posicionamento RTK apresente precisão centimétrica na determinação das coordenadas planas de um ponto, existem algumas restrições que devem ser observadas:

- ✓ Entre as antenas de base e a rover deve existir um limite na distância, preferencialmente de 10 km.
- ✓ Deve existir conexão através de rádio. Esse limite de distância de 10 Km dá-se principalmente devido ao sinal do rádio transmissor, pois a situação do terreno (relevo) é fundamental para o sinal do rádio.

O equipamento utilizado neste trabalho foi o GPS System 500 - SR530. As coordenadas planimétricas foram calculadas com uma precisão da ordem de 1cm e as altimétricas de 2 cm. As características da antena GPS System 500 aplicado nesta pesquisa podem ser vistas no Anexo A deste trabalho. Vide o modelo na Figura 1.3.

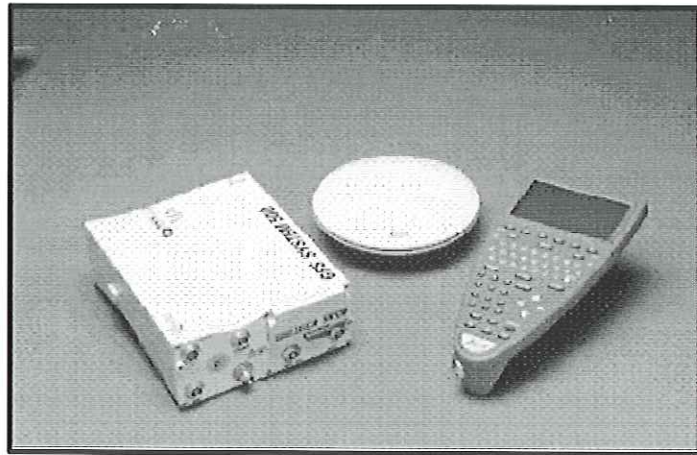


Figura 1.3 – Modelo do GPS 530

O RTK apresenta uma confiabilidade nos resultados de 99,99 %. Para obter essa precisão o GPS começa a rastrear pelo menos quatro satélites em L1, dando início ao posicionamento em Tempo Real usando apenas o código. Quando o GPS estiver rastreando cinco satélites em L1 e em L2, o sistema inicia a busca da resolução da ambigüidade² e calcula as ambigüidades usando os satélites mais adequados. Então, o receptor GPS ROVER repete o algoritmo de busca da ambigüidade com um outro grupo de satélites. Ou seja, uma segunda resolução da ambigüidade. Em seguida, essa segunda resolução da ambigüidade é comparada com a primeira. Se as duas forem idênticas, as ambigüidades são consideradas corretas e a posição é calculada no ROVER com precisão na ordem de 1 cm na posição horizontal e 2 cm na altitude geométrica (LEICA GEOSYSTEM)

Somente após essa seqüência é que o sensor do receptor GPS remoto definirá que o sinal do ponto alcançou a máxima precisão. Em seguida, para manter a confiabilidade das posições, o sistema continua a resolver as ambigüidades internamente. Enquanto as ambigüidades coincidirem o sistema mantém a indicação da precisão. Caso haja uma não coincidência, o sistema altera imediatamente para a solução float³ e emite um sinal de alerta ao usuário. (LEICA GEOSYSTEM)

O sistema resolve a ambigüidade duas vezes, aplica as análises estatísticas e calcula as coordenadas da antena GPS com a confiabilidade de 99,99% e tudo isso em menos de 10 segundos. Por isso, se o sistema não estiver indicando a resolução da ambigüidade, é porque os dados disponíveis não são os melhores (a constelação dos satélites não está com a melhor geometria ou as informações enviadas no sinal pelos satélites não são os melhores). (LEICA GEOSYSTEM). O esquema de funcionamento do GPS RTK pode ser visto na figura 1.4.

² Ambigüidade: é a técnica da resolução da dupla diferença da fase da portadora do sinal GPS para calcular a fração do ciclo de onda da portadora L1 e L2. Com isso, a distância é calculada com precisão, pois, o receptor GPS identifica o número inteiro de ondas e a fração do ciclo.

³ Solução Float: Quando o receptor GPS calcula a distância entre o satélite e a antena usando somente código e não resolve a ambigüidade.

Verificando a figura 1.4, observa-se que, a antena da BASE recebe sinal de no mínimo quatro satélites, simultaneamente, a antena ROVER também recebe sinal dos mesmos quatro satélites. O receptor de base processa os sinais recebidos e calcula a distância entre a antena e os satélites com a resolução da ambigüidade. O receptor ROVER também processa os sinais recebidos e calcula a distância entre sua antena e os satélites com a resolução da ambigüidade. O receptor BASE envia em tempo real para o receptor ROVER as correções de suas coordenadas, então, o receptor ROVER calcula sua posição em relação à antena BASE e emite a posição do ponto ROVER.

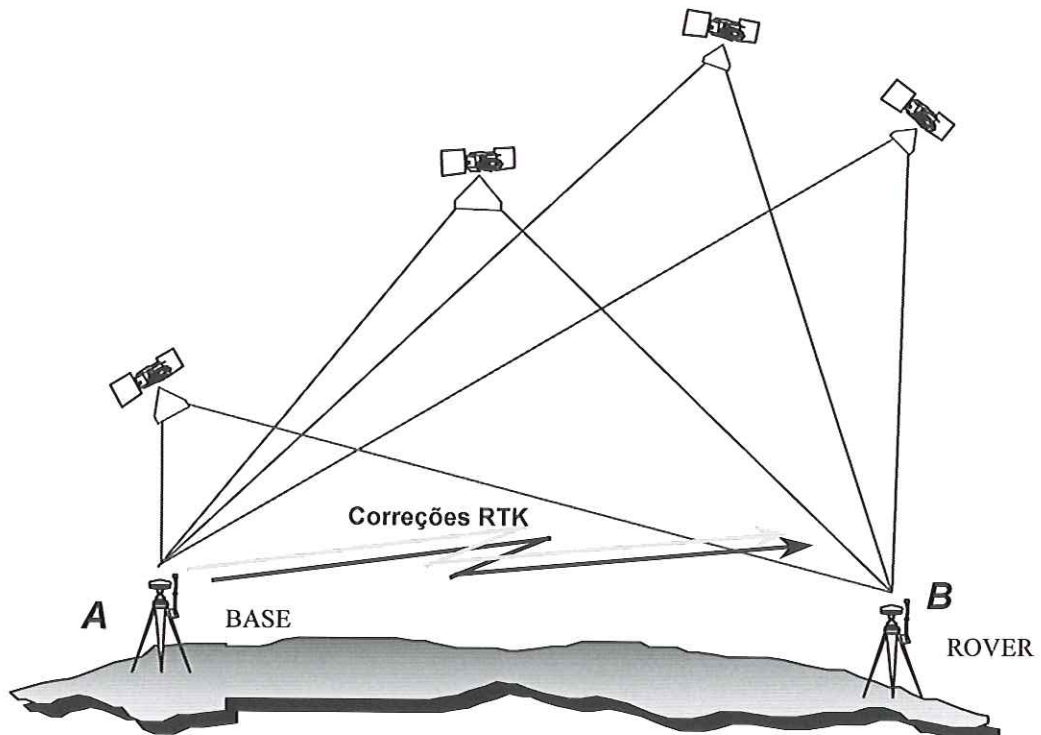


Figura 1.4 Esquema do funcionamento do GPS RTK

CAPÍTULO 2

MODELO NUMÉRICO DO TERRENO (MNT)

2.1 – Definição e característica do MNT

O modelo numérico é uma representação matemática da superfície física (topográfica), a qual é uma função contínua sendo a altura de cada ponto variada. (GONÇALVES & FERNANDES 1996). Neste trabalho o MNT vai ser gerado por processos fotogramétricos digitais.

Segundo ARAÚJO (1991), para representar a superfície física no computador é indispensável criar os modelos digitais, que são formados a partir de uma rede de pontos na forma de grade. No processo de modelagem numérica de terreno podemos distinguir duas fases: a aquisição dos dados e a geração das grades. A fase de aquisição de dados pode ser por levantamentos de campo e por medições fotogramétricas obtidas a partir de modelos estereoscópicos. Os formatos de grade podem ser regular ou irregular. Esses formatos simplificam e tornam mais rápidos os processos computacionais.

A aquisição de dados no levantamento de campo deve permitir reproduzir o mais fiel possível as características topográficas do terreno. Portanto, o conjunto de amostras de entrada para a construção de um modelo numérico deve conter pontos necessários para definir as linhas características da superfície física tais como: linhas divisórias de água (linhas de máximo) e linhas de drenagem (linhas de mínimos), como pode ser visto na figura 2.1.

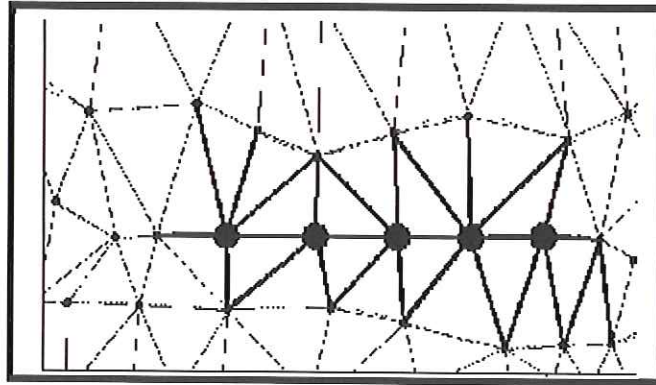


Figura 2.1 - Linha de drenagem (córrego)

Para a aquisição de dados, a partir de modelos estereoscópicos, a imagem deve estar devidamente orientada. Com a orientação do modelo estereoscópico pode-se ver o modelo tridimensional do terreno, mas ainda não existe um modelo matemático que possa ser manipulado pelo operador, dessa maneira, torna-se necessário gerar o Modelo Numérico Terreno (MNT).

O processo de geração de um MNT de grade compreende a construção de uma malha, regular ou irregular, e a definição de funções de interpolação locais. Essas funções são definidas para cada elemento da malha. Assim, para cada elemento básico da grade, (retângulos ou triângulos) define-se uma função de interpolação que é válida para os pontos internos ao elemento. Esse processo é conhecido como ajuste de superfície. Cada função de ajuste - normalmente um polinômio - é definida utilizando-se os vértices dos elementos e em muitos casos os vértices dos elementos vizinhos também.

2.1.1 - MODELO DE GRADE REGULAR

De acordo com ANDRADE (1998), o processo para gerar a grade regular consiste em estimar os valores de Z (cota, altura ou altitude) de cada ponto da grade, a partir do conjunto de amostras de entrada. Vide figura 2.2. Quando se usam de todas as amostras para interpolar cada ponto da grade diz-se que a interpolação é global, porém,

fica um pouco difícil uma função polinomial capaz de representar satisfatoriamente todas as variações espaciais do fenômeno em estudo. Assim, é muito comum utilizar-se de interpolação local para o cálculo da cota de cada elemento da grade. Existem várias maneiras para a realização da interpolação. As mais conhecidas são: Interpolação do **Vizinho mais próximo**, Interpolação **Bilinear**, Interpolação “**Spilines**” **Bicúbicas**. A Tabela 1 resume as características de cada um desses interpoladores.

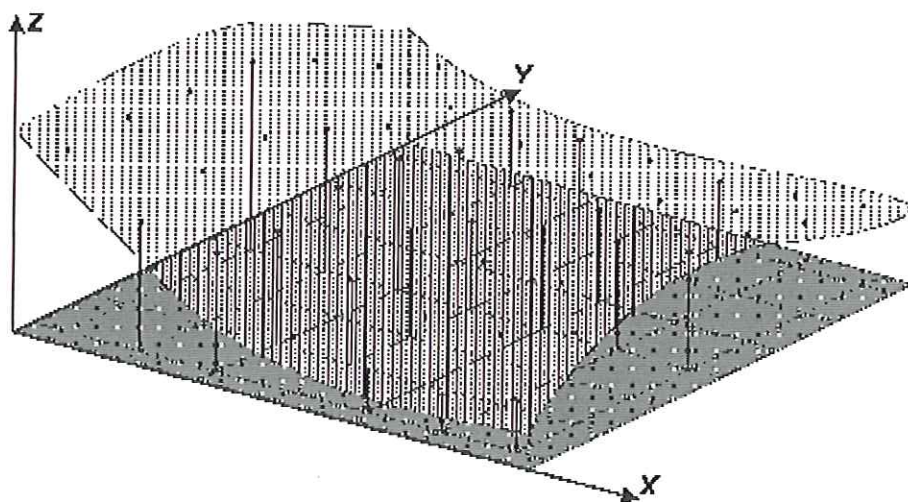


Figura 2.2 – Modelo de grade Regular

TABELA 1 – Características dos Métodos de Reamostragem

Método de Interpolação	Entorno de Interpolação	Adições Multiplicações	Erros de Interpolação
Vizinho mais próximo	1x1	1	15,7%
Interpolação bilinear	2x2	8	3,7%
“Spilines” bicúbicas	4x4	110	0,3%

Fonte Andrade (1998)

A principal vantagem do método Vizinho mais Próximo comparando as três técnicas é a rapidez do tempo de cálculo. Ele também tem a vantagem de não modificar

os dados da imagem original, porém, visto que uma interpolação contínua não está sendo realizada, a imagem pode apresentar um resultado final um tanto irregular.

A vantagem da interpolação Bilinear é a nuvem (área, aproximadamente retangular) que aparece como resultado. Este resultado é importante, pois os detalhes de alta frequência são filtrados. Em relação ao tempo de cálculo é mais lento do que a interpolação do Vizinho mais próximo e mais rápido do que a interpolação "Spiline" Bicúbica, que é a técnica de re-amostragem mais rigorosa das três em relação à teoria básica de processamento de sinal.

2.1.2 - MODELO DE GRADE IRREGULAR

Em um modelo de grade irregular os pontos, que caracterizam a superfície, são conectados por linhas para formar triângulos, que pode ser vista na figura 2.3. Assim, diferentemente da geração da grade regular, os valores de cota dos vértices dos elementos triangulares da malha triangular não precisam ser estimados por interpolações. (GONÇALVES & FERNANDES 1996).

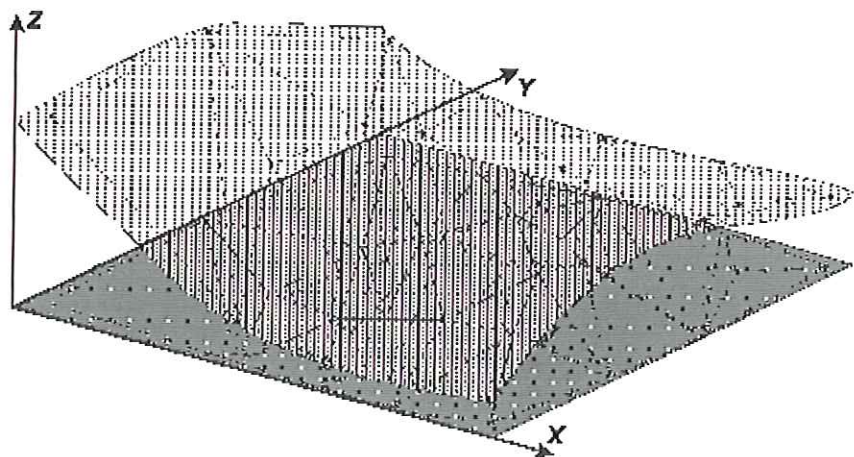


Figura 2.3 – Modelo de grade Irregular

Adotando critérios específicos para construção de rede triangular, pode-se chegar a malhas únicas, chamadas de triangulação de Delaunay, que utiliza o critério de

maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo. Equivale dizer que, a malha final deve conter triângulos o mais próximos possível de equiláteros, evitando-se a criação de triângulos afinados, isto é, triângulos com ângulos internos muito agudos. Esse critério determina que o círculo que passa pelos três vértices de cada triângulo da malha triangular não tem, no seu interior, nenhum ponto do conjunto das amostras, além dos vértices do triângulo em questão. (GUEDES 2001).

2.1.3 - ANÁLISES SOBRE MODELOS NUMÉRICOS DO TERRENO

Os modelos digitais são utilizados em uma série de procedimentos de análises úteis para aplicações de geoprocessamento. A utilização de modelos digitais nas análises, possibilita o estudo de um determinado fenômeno sem a necessidade de se trabalhar diretamente na região geográfica escolhida. Estas análises podem ser qualitativas ou quantitativas e são importantes para fins de simulação e tomadas de decisão no contexto de desenvolvimento de aplicações ou modelagens de geoprocessamento.

As análises desenvolvidas sobre um modelo digital de terreno permitem: visualizar os modelos em projeção geométrica plana; gerar imagens de nível de cinza, imagens sombreadas e temáticas; calcular volumes de aterro e corte; realizar análises de perfis sobre trajetórias predeterminadas; gerar mapeamentos derivados, tais como: mapas de declividade e exposição, mapas de drenagem, mapas de curvas de nível e mapas de visibilidade. Os produtos das análises dos MNTs podem, ainda, ser integrados a outros tipos de dados geográficos, objetivando o desenvolvimento de diversas aplicações de geoprocessamento, tais como: planejamento urbano e rural, análise de aptidão agrícola, determinação de áreas de risco, geração de relatório de impacto ambiental e outros.

CAPÍTULO 3

FOTOGRAMETRIA

3.1 – Introdução a Fotogrametria

Após a invenção da fotografia, a fotogrametria foi um acontecimento com alcance extraordinário que estabeleceu métodos eficientes para levantamentos e mapeamentos topográficos.

Fotogrametria é a ciência e tecnologia de obter informações confiáveis através de processos de registro, interpretação e mensuração de imagens (ANDRADE 1998), e tem o objetivo de desenvolver uma técnica para capturar elementos físicos proporcionando a possibilidade de identificá-los de maneira tal que possam ser determinadas suas características físicas como: largura, comprimento, espessura e cor.

Segundo WOLF (1974), a fotogrametria é subdividida em duas áreas: a Fotogrametria métrica que se caracteriza por fornecer medidas precisas para determinar as formas e dimensões dos objetos e a *Fotogrametria interpretativa*, que se caracteriza por permitir o reconhecimento e identificação dos objetos.

A Fotogrametria métrica se subdivide em: *Fotogrametria terrestre*, pela qual as fotografias são obtidas através de câmaras instaladas em estações localizadas na superfície terrestre e a *Fotogrametria aérea ou Aerofotogrametria*, pela qual as fotografias são obtidas através de câmaras localizadas em estações no espaço, geralmente em aeronaves.

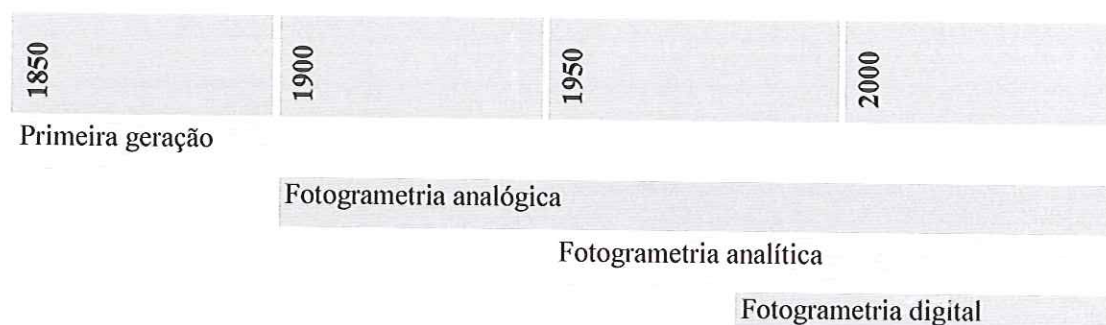
Atualmente, a fotogrametria é vista em três fases, SCHENK (1999):

- ✓ *A Fotogrametria analógica*, a qual é caracterizada pela invenção da estereofotogrametria.
- ✓ *A Fotogrametria analítica*, que começou com a invenção do computador. O desenvolvimento da tecnologia computacional muito contribuiu para o progresso da fotogrametria.

- ✓ *A Fotogrametria digital*, a qual se fez uso de imagens digitais em vez de imagens analógicas (fotografias). No entanto, somente na quinta geração de computadores é que foi possível desenvolver *hardware* e *software* capazes de salvar, recuperar e manipular tamanhos grandes de imagens.

A Tabela 2 resume a evolução da fotogrametria. A fotogrametria digital será tratada com mais detalhes no próximo capítulo.

TABELA 2 – Evolução da Fotogrametria



Fonte Schenk (1999)

3.2 – Funcionamento da Fotogrametria

O princípio da fotogrametria é a “reconstrução” do terreno fotografado, com o uso de pares de fotografias. Essas duas fotografias em seqüência de uma mesma faixa de vôo formam o chamado modelo estereoscópico, estereomodelo, ou ainda, modelo óptico tridimensional. Para formar um modelo estereoscópico, a partir de um par de fotografias, é preciso antes de tudo realizar operações de orientação desse modelo. Essa orientação é dividida em duas etapas denominadas de **orientação interna** e **orientação externa**. (ANDRADE 1998).

A orientação interna é a operação de recuperação da posição da fotografia em relação à câmara, ou seja, ela permite a reconstrução do feixe perspectivo que gerou a fotografia. Na Fotogrametria Digital, ela consiste de um arquivo contendo: as marcas fiduciais com coordenadas calibradas, o ponto principal com o valor das coordenadas, a

distância focal calibrada e os parâmetros de distorção radial simétrica e descentrada. Um algoritmo de transformação é utilizado para converter as coordenadas do sistema fiducial para o sistema de coordenadas da máquina aerofotogramétrica. Esse processo elimina as distorções do filme, garantindo boa qualidade métrica. Para tanto é indispensável ter o certificado de calibração da câmara fotogramétrica utilizada.

A orientação externa permite a recuperação da posição e atitude⁴ de cada foto, segundo um referencial terrestre, geralmente aquele no qual se pretende realizar o trabalho fotogramétrico. Uma foto está orientada externamente segundo um referencial adotado quando são conhecidas as coordenadas $X0$, $Y0$, $Z0$ do ponto onde foi tomada a fotografia (*centro de perspectiva*), bem como os ângulos que definem sua atitude, os *ângulos de Euler*, ω (*Ômega*), φ (*Phi*), χ (*Kappa*). Estes ângulos representam rotações, que aplicados ao sistema terrestre, fazem-no coincidir com o fotogramétrico.

A orientação externa é realizada em duas etapas: **orientação relativa e orientação absoluta.**

- ✓ A *orientação relativa* tem por objetivo orientar em posição e atitude o par de fotografias entre si, portanto sem considerar o referencial terrestre como pode ser visto na Figura 3.1.

⁴ Atitude: são os movimentos da aeronave nos eixos X, Y e Z.

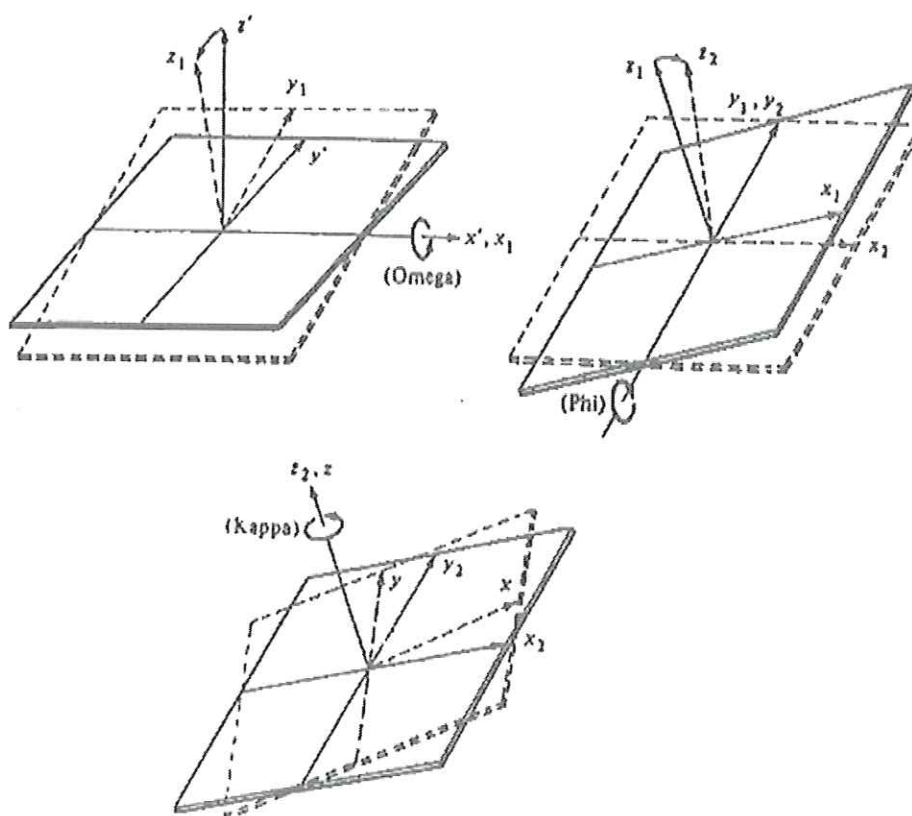


Figura 3.1 – Orientação Relativa

A orientação relativa pode ser entendida como a determinação do sistema fotogramétrico de uma fotografia em relação ao de outra.

- ✓ A *orientação absoluta* é o conjunto de operações necessárias para colocar o modelo estereoscópico em posição, escala e atitudes corretos em relação ao referencial adotado como é mostrado na Figura 3.2.

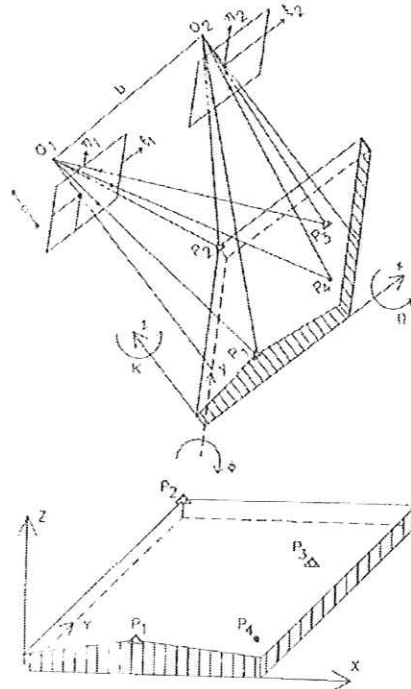


Figura 3.2 – Orientação Absoluta

A orientação absoluta serve para colocar o modelo em posição, escala e atitude corretos em relação ao referencial cartográfico. Esta etapa corresponde a materializar o referencial cartográfico.

3.3 – Restituidores

De acordo com ANDRADE (1998), é com a finalidade de “reconstruir” o terreno, que surge o conceito de restituição. Com ferramentas adequadas, pode se executar medições no modelo estereoscópico como se fossem no próprio terreno. Assim um restituidor fotogramétrico é um aparelho capaz de transformar um par de fotografias, que são imagens ^{em} perspectiva do terreno, em uma projeção ortogonal do que for compilado. Para tanto, o restituidor permite formar modelos ópticos tridimensionais do terreno fotografado; medir coordenadas dos pontos no estereomodelo; compilar feições das imagens; e representar o relevo do terreno, por meio de curvas de nível e de pontos cotados.

Existem três tipos de restituidores: **os restituidores analógicos, os restituidores analíticos e os restituidores digitais:**

- ✓ *Restituidores analógicos* foram os primeiros instrumentos utilizados para realizar a estereocompilação de aerofotos. A solução analógica permaneceu até que os computadores ganharam velocidade de cálculo, memória e preço para competir com a analogia. As equações projetivas centrais são resolvidas analogicamente por esses restituidores fotogramétricos. Mais tarde, com o desenvolvimento dos computadores, os instrumentos analógicos passaram a funcionar **assistidos por computador**, ganhando muita versatilidade em termos de coleta de dados e de edição.
- ✓ *Restituidores analíticos* surgiram quando os computadores passaram a se incorporar nos instrumentos de restituição, então, todos os cálculos são realizados através de algoritmos programados para o computador e os movimentos das fotos são realizados através de servos-mecanismos.
- ✓ *Restituidores digitais* surgiram quando os computadores foram dotados de periféricos específicos e daí chamados de **estação de trabalho**, que pode ser vista na Figura 2.3. Eles processam programas para restituição ou estereocompilação, usando imagens digitais. Não seria correto, por exemplo, falar em restituidor digital como sendo uma máquina. Na verdade é possível utilizar o computador com alguns periféricos (estação de trabalho) para os mais variados fins, dependendo do *software* residente. É possível utilizar o computador pessoal para levantar dados de *DEM (Digital Elevation Model – Modelo Digital de Elevação)* num dia e no dia seguinte usá-lo para preparar um projeto de estradas ou de arquitetura. Assim estudar tarefas específicas em lugar de pensar em instrumentos polivalentes faz muito sentido.

Para fins de vocabulário, neste trabalho os termos: estação de trabalho, sistema fotogramétrico digital, restituidor fotogramétrico digital ou restituidor digital terão a mesma conotação.



Figura 3.3 – Modelo de Estação de Trabalho

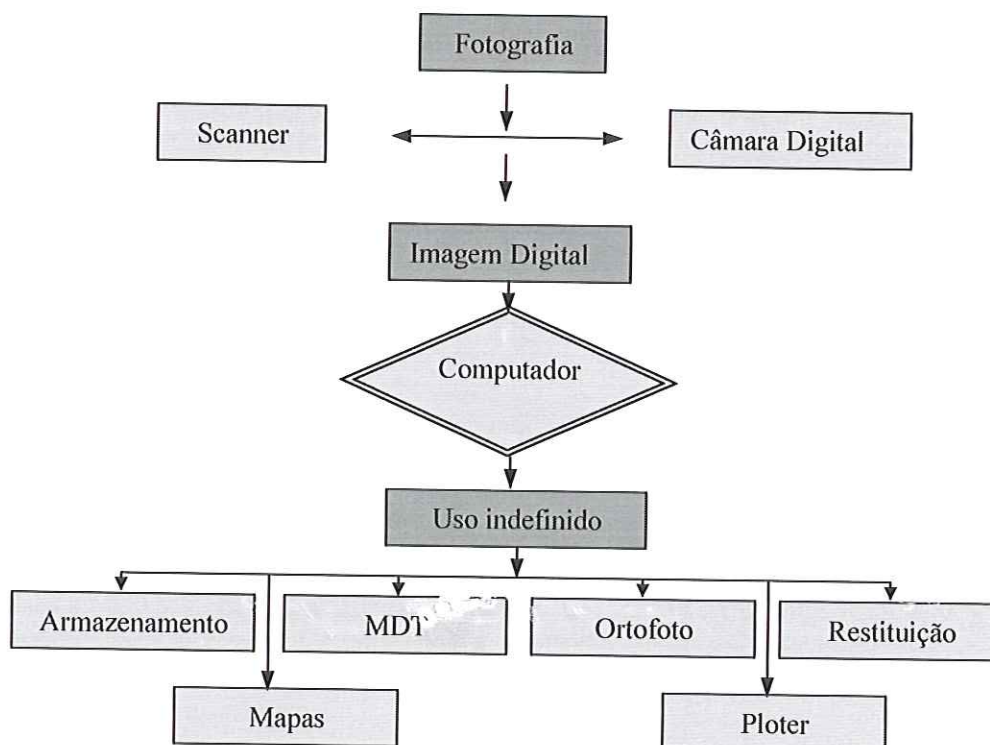
CAPÍTULO 4

FOTOGRAMETRIA DIGITAL

4.1 – Introdução

Os conceitos de fotogrametria mudaram muito com a fotogrametria digital, pois é necessário associar à máquina-computador com o programa que está sendo usado. ANDRADE (1998). A fotogrametria digital é baseada no uso de imagens digitais, armazenadas em meio magnético e na forma de pixel. E ainda, está fundamentada no princípio da estereoscopia e na orientação das fotografias aéreas. O fluxograma abaixo representa o princípio da fotogrametria digital a partir da fotografia analógica.

FLUXOGRAMA ESQUEMÁTICO DA FOTOGRAMETRIA DIGITAL



Fonte Schenk (1999)

4.2 – Formato da Imagem Digital

Para se entender o processo da fotogrametria digital é necessário conhecer como se comportam e se caracterizam as imagens digitais. A figura 4.1 representa a imagem digital, no formato de uma malha (matriz), obtida de uma fotografia aérea digital.

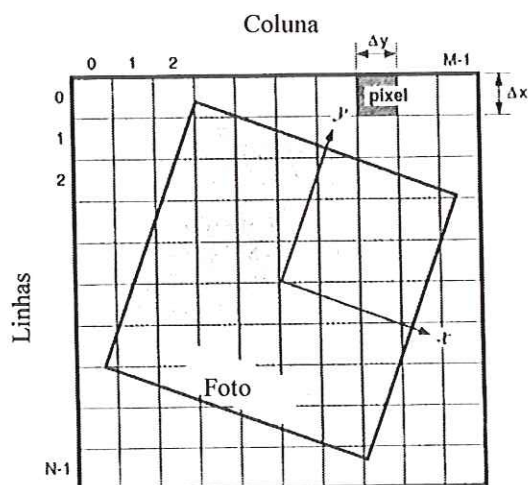


Figura 4.1 – Uma imagem Digital Esquemática

Segundo SCHENK (1999) e WOLF (1974), uma imagem é considerada digital, quando todos os elementos nela contidos podem ser interpretados por um valor numérico e ainda possam ser encontrados no espaço. Considerando isso, é possível dizer que uma fotografia digitalizada é possível encontrar a posição de cada detalhe e este é representado por um número, que são distribuídos em forma de matriz.

A posição dos elementos na matriz é dada pela coordenadas da cada elemento, que são representadas por x e y . A variação entre as coordenadas, Δx e Δy , defini-se um pixel. As dimensões de cada pixel vão determinar os valores de $\Delta \xi$, $\Delta \eta$, que é o pixel na fotografia. Os pixels trazem as informações dos objetos reais e o valor do pixel depende de tipo de saída do instrumento de captura (scanner) e do computador em uso.

Para as imagens preta e branca, varia entre 0 a 255 tons de cinza, que é o valor de cinza ou densidade, sendo, 0 para o preto e 255 para o branco. As informações contidas

nos 256 valores diferentes podem ser armazenadas em 8 *bits* (2^8 *bits* de combinações). E, um grupo de 8 *bits* é tratado como uma unidade, um *byte*, nos computadores atuais. Para as imagens coloridas existem três matrizes iguais, porém de *layers* (cores) diferentes: *red* (*vermelho*), *green* (*verde*) e *blue* (*azul*), a conhecida combinação RGB.

Segundo SCHENK (1999), se a imagem digital é para uso na fotogrametria, a relação entre a posição do pixel e o sistema de coordenadas $\xi\eta$ da fotografia deve existir. Como pode ser visto na figura 4.1, se multiplicar o número da linha por Δx tem-se a coordenada ξ na fotografia, se multiplicar o número da coluna por Δy tem-se a coordenada η na fotografia. Portanto a medição de coordenadas na imagem digital é pela identificação de pixels. Esse processo descrito é a restituição fotogramétrica.

4.3 –Acurácia Geométrica e Resolução Espacial da Imagem Digital

É impossível falar em imagem digital e não definir Acurácia Geométrica e Resolução Espacial. A acurácia é a precisão em que algoritmos determinam a localização do centróide do pixel e a resolução espacial é a dimensão de cada um deles. SCHENK (1999).

A resolução espacial é expressa no número de pixels contidos numa determinada medida linear. Pois, quanto melhor, maior é o número de pixels e conseqüentemente menor o tamanho dos mesmos. A Tabela 3 mostra que mais ou menos 1GB (gigabytes) é necessário para armazenar um negativo de 9” x 9”escaneado com um pixel de 7,5 μm .

TABELA 3 – Tamanho do Pixel, número de pixels e quantidade de memória para uma imagem digital de uma fotografia aérea 9”X9”, baseada em imagens quantizadas em 256 níveis de cinza, sendo que, um pixel exige um byte.

Tamanho do pixel (micron)	Número de pixels	Quantidade de memória (MegaBytes), comprimida
960	240x240	0,058
480	480x480	0,230
240	960x960	0,922
120	1920x1920	3,686
60	3840x3840	14,746
30	7680x7680	58,982
15	15360x15360	235,931
7,5	30720x30720	943,721

Fonte Schenk (1999)

Observando a Tabela 3 verifica-se, por exemplo, uma imagem digital com uma resolução espacial de 30 μm e passa para 60 μm porque detalhes são perdidos. Isso pode interferir na interpretação da imagem.

Observa-se que quanto maior a imagem e menor o tamanho do pixel a quantidade de memória também é maior, daí a importância de salientar que as técnicas de compressão de imagens são bem vindas. Por exemplo, o algoritmo de compressão *JPEG* (*Joint Photographic Experts Group*) pode diminuir até um terço o tamanho da imagem sem perder a qualidade (SCHENK 1999).

4.4 – Resolução Radiométrica de Imagens Digitais

Para a imagem digital é fundamental conhecer a precisão da coloração da imagem, isto é, as cores que cada pixel pode assumir. Quanto melhor a resolução radiométrica, mais fiel será a imagem digitalizada em relação à imagem original no

tocante a sua coloração, pois terá uma qualidade pictória melhor. Porém obviamente, quanto melhor a resolução radiométrica, maior será o tamanho em *bytes* da imagem obtida, pois cada pixel ocupará um número maior de *bits* para traduzir essa informação pictória.

4.5 – Captação de Imagens Digitais

As imagens digitais para fotogrametria são captadas basicamente de três maneiras: com os **sensores espaciais (satélites)**, com as **câmaras digitais** e com os **imageadores ou numerizadores (scanner)**. SCHENK (1999).

Os sensores espaciais abrangem diferentes dispositivos de captação de imagens, que vão de câmaras fotográficas, câmaras de TV, radares, sistemas laser até os modernos sensores *CCD (Charge Coupled Devices – Dispositivo de Acoplamento de Cargas)*.

Tanto os scanners, como as câmaras digitais possuem o mesmo tipo de dispositivo, o *CCD*, que é constituído num arranjo de diodos fotosensíveis de autovarredura, também conhecidos como arranjos de estado sólido, diferentemente das câmaras de TV, baseadas, em frágeis tubos de vidro com uma região sensível a luz (*vidicons, pumblicons, orthicons* e outros).

A diferença principal de uma câmara digital e um scanner está no sistema ótico, onde o mesmo é projetado nas diversas situações. Por exemplo, uma câmara é utilizada para captar imagens com maior distâncias do que os scanners. Outra diferença importante é que as câmaras digitais a fonte de iluminação é externa, como em máquinas fotográficas comuns, enquanto que os scanners possuem seu próprio sistema de iluminação.

Os scanners fotogramétricos são equipamentos usados para converter o conteúdo das fotografias de forma analógica (uma imagem com tonalidade contínua) para imagem de forma digital (uma matriz de pixels com seus respectivos níveis de cinza representados numericamente).

Existem vários scanners fotogramétricos de qualidade no mercado. Eles se diferem em na conversão digital (ou na quantização), porém os conceitos fundamentais

são os mesmos. É essencial que um scanner fotogramétrico tenha uma resolução radiométrica e geométrica tão boa quanto uma alta precisão geométrica.

A geometria ou resolução espacial de um scanner é uma indicação do tamanho do pixel da imagem resultante. Quanto menor tamanho do pixel maior a quantidade de detalhes que pode ser detectado na imagem. Os scanners fotogramétricos de alta qualidade são capazes de produzir imagens com pixels da ordem de 5 μm a 15 μm de tamanho. (SCHENK 1999). A resolução radiométrica de um scanner é uma indicação do número de níveis quantizados (correspondendo à diferente densidade da imagem) associado com o pixel. A mínima resolução radiométrica pode ser 256 níveis (8-bit) e atingir 1024 níveis (10-bit) ou ainda melhor.

A qualidade geométrica de um scanner fotogramétrico de alta precisão, que é expressa pela acurácia da posição do pixel na imagem resultante, podem alcançar nível de 2 μm a 3 μm .

4.6 – Correlação em Imagens Digitais

De acordo com o ANDRADE (1998), SCHENK (1999) e WOLF (1974), a correlação é o princípio que desempenha uma tarefa importante na fotogrametria digital. Pois, compara as matrizes das duas imagens e identifica os pontos homólogos, para isso, uma das matrizes de uma das imagens se considera a **amostra**, que passa pixel a pixel em uma janela da outra imagem que é denominada de **matriz de busca**.

Quando a matriz amostra é comparada com a de busca são formadas várias outras matrizes chamadas de matrizes candidatas. Os valores destas dependem do método de correlação aplicado. Este define quais das matrizes candidatas têm maior probabilidade de ser a homóloga da amostra.

A figura 4.2 representa como se comportam: as matrizes de amostra e a de busca. O valor de comparação depende do método aplicado. Este define entre as diversas matrizes candidatas qual a que tem maior probabilidade de ser a homóloga da matriz de amostra.

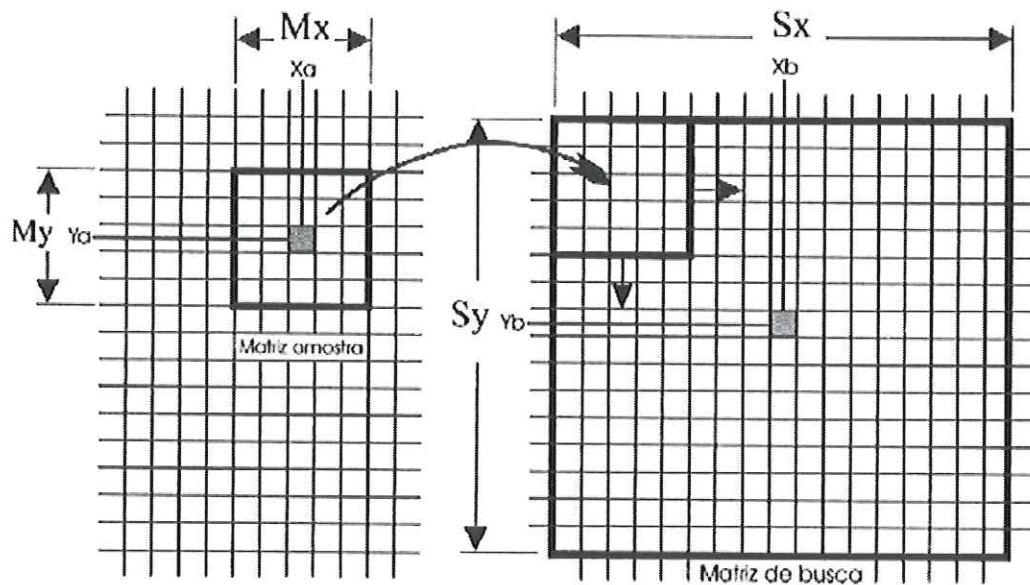


Figura 4.2 – Exemplo de matriz candidata

Segundo ANDRADE (1998), os processos de comparação disponíveis são para automatizar a identificação de imagens. São os algoritmos de comparação, que são equações estatísticas, dois deles são: o de correlação e o dos mínimos quadrados. Os algoritmos de comparação por correlação têm como dados os valores de cor de cada imagem. O valor da correlação varia entre -1 e $+1$. Se valor for o mais próximo de $+1$, significa que, deslocando a matriz de amostra pixel a pixel sobre a matriz de busca é o ponto homólogo entre as duas matrizes. O algoritmo de comparação dos mínimos quadrados somente muda a equação de correlação estatística.

Existem na fotogrametria digital três tipos de pontos que podem ser identificados automaticamente, os quais são: **as marcas fiduciais, os pontos de controle e os pontos fotogramétricos.**

- ✓ As marcas fiduciais, que são sinais bem definidos e com localização conhecida na fotografia. Isto facilita enormemente o processo de identificação e medição.

- ✓ Os pontos de controle, que apresentam uma variedade enorme de tipos, desde feições naturais até alvos artificiais de diferentes formas e tamanhos e com diferentes graus de “corrupção” da aparência.
- ✓ Os pontos fotogramétricos podem ser selecionados por um operador, visando obter boa qualidade ou podem ser escolhidos automaticamente sem que nenhum critério de qualidade de imagem seja considerado.

4.7 – Precisão de mapeamentos obtidos a partir de imagens digitais

Segundo CHAVES (1998) apud ARONOFF (1989), a precisão de um mapa é a probabilidade da posição de um ponto ser verdadeira, ou seja, é a maior proximidade que esta posição tiver da posição encontrada através de meios considerados mais precisos, no caso deste trabalho, são os pontos coletados com o GPS RTK.

Segundo CHAVES (1998) apud MERCHANT (1982), a exatidão de um mapa é verificada a partir da comparação das coordenadas do terreno com as do mapa, de pelo menos vinte pontos bem definidos no mapa. A Tabela 15 que apresenta a comparação altimétrica entre 20 pontos.

No Brasil, o Decreto 89.817/84⁵ - Instruções reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional nas suas especificações gerais classificam as cartas quanto à exatidão segundo o seguinte critério:

Noventa por cento dos pontos isolados de altitude obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testados no terreno, não deverão ultrapassar o padrão cartográfico estabelecido.

Neste trabalho as curvas de nível foram interpoladas com equidistância de 1 m. Portanto, o padrão cartográfico estabelecido não deve ultrapassar três quartos dessa equidistância, ou seja, 0,75 m e o erro padrão não devem ultrapassar a metade da equidistância, ou seja, 0,5 m, sendo classificada de acordo com a exatidão na classe C.

⁵ Decreto n.º 89.817 – Diário Oficial da União, 1984.

CAPÍTULO 5

ORTOFOTO

5.1 – Definições de ortofoto

A ortofoto ou ortoretificação, segundo ANDRADE (1989), é a fotografia resultante da transformação de uma foto original que é uma perspectiva central do terreno em projeção ortogonal sobre um plano. Desta maneira, os objetos ou pormenores, nela contidos são apresentados, conforme TAVARES & FAGUNDES (1991), em suas verdadeiras posições ortográficas.

A ortofoto é um mapa que mostra os detalhes de uma fotografia aérea (foto-mapa). Este é mais atrativo do que os mapas compostos de linhas topográficas convencionais. São significativamente menos dispendiosos devido às características exclusivas deste tipo de produto, que além de equivaler a um mapa de traço, permitem ver exatamente o objeto e não símbolos representativos como os mapas restituídos, que não são suficientes para caracterizar uma determinada região. As ortofotos somente são possíveis de realizar através do uso associado dos modelos digitais do terreno com os pares estereoscópicos orientados. KRAUS (1993).

A topografia, a escala da fotografia, a abertura do ângulo de tomada da fotografia e a estabilidade da plataforma da aeronave causam distorções nas ortofotos, que são corrigidas no decorrer do processo de ortoretificação das fotografias aéreas.

Existem métodos analógicos e digitais de produzir ortofotos. A ortofoto analógica é uma imagem produzida através de fotografias aéreas convencionais, modificadas a partir do uso de equipamentos analógicos de ortoretificação, que perfílham o terreno criando um tipo de modelo digital do terreno que é usado na retificação das imagens. Já a ortofoto digital é uma imagem produzida totalmente em meio digital, modificada a partir de algoritmos de ortoretificação, que usam modelos digitais do terreno levantados à priori, automaticamente, através de algoritmos de correlação de imagens ou manualmente por um operador. Deve-se notar, contudo, que mesmo para os

sistemas digitais são necessários também, periféricos analógicos para a saída final da imagem ortoretificada.

5.2 - Ortofoto Digital

Quando evidenciamos a busca da tecnologia de ponta para mapeamentos, somos obrigados a observar as grandes vantagens apresentadas pelas ortofotos digitais. Pois, elas apresentam: facilidades na manipulação e armazenamento e exibição dos dados cartográficos, tornando mais acessível economicamente, possibilitando a confecção de mapas de qualidade adequada à realidade brasileira.

Para a realização de ortofotos digitais o principal instrumento é o computador onde, através de programas aplicativos, retificam-se os valores da imagem distorcida transformando a imagem original em uma imagem com valores da grade da matriz retificada. A figura 5.1 representa a geometria de uma aerofotografia, que assume a geometria rigorosa de uma aerofotografia com *projeção central*.

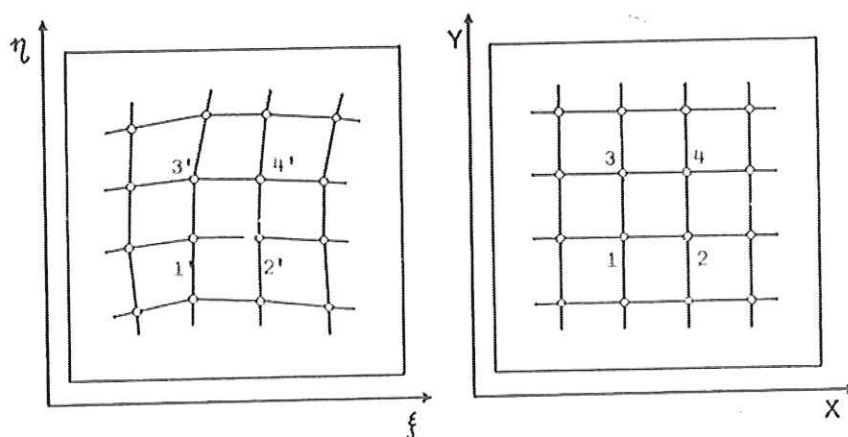


Figura 5.1 – Geometria de uma aerofotografia

As primeiras exposições de um sistema de software para criação de uma ortofoto digital a partir de um MNT foram citadas por KEATING (1979). Estes sistemas substituem todo o arsenal da projeção ótica por sensores eletrônicos, que digitalizam pequenas partes da imagem, um processador, que posiciona o sensor, e um controlador

de filme, que direciona a exposição de cada pixel sobre o filme. A retificação digital, atualmente, é produzida em módulos de “workstations” (estações de trabalho) e sistemas de processamento de imagens, que permitem a combinação de ortofotos digitais com dados vetoriais.

De acordo, com o WIESEL (1991), MUNICH (1991) e ALMEIDA (1989), para a realização de ortofotos digitais são exigidos os seguintes dados de entrada:

- ✓ O MDT, que resulta na matriz dos valores de cinza na ortofoto, contendo coordenadas terrestres (UTM) nas três dimensões dentro de uma equidistância raster;
- ✓ As marcas fiduciais na imagem digital, que dependem do tipo da câmara aérea;
- ✓ Os pontos de controle digitalizados grosseiramente na foto impressa;
- ✓ A orientação externa, que é os parâmetros da câmara fotogramétrica (altura de vôo, ângulos de rotação da aeronave);
- ✓ Os pontos de controle correspondentes no terreno;
- ✓ As informações de calibração da câmara, que incluem: parâmetros de orientação interna (calibração das lentes focais, pontos principais de autocolimação e simetria com os respectivos centros fiduciais e os valores de distorção das lentes), as marcas fiduciais calibradas e a distorção real da imagem;
- ✓ A matriz original da imagem com os valores de cinza;
- ✓ E as relações da matriz da imagem com o sistema de coordenadas da imagem.

5.3 - Custo e Benefício da Ortofoto Digital

A análise de custo e benefício em geral apresenta, segundo BÄHR & WIESEL (1991), um procedimento muito difícil. O “custo” pode ser facilmente computado em função do “hardware”, do “software” e da hora-homen, enquanto que o “benefício” é um “efeito indireto”, o qual não pode ser expresso por números. Os efeitos indiretos podem

ser mostrados como a melhoria de qualidade dos resultados, bem como, a flexibilidade de processamento dos dados. Isso conduz finalmente, a integração das ortofotos digitais nos sistemas de informações geográficas e a extração automática de objetos de topologia e semântica.

Claramente, a ortofoto digital, segundo BONIFACE (1992), é uma base ideal para a atualização de mapas de linhas existentes, exibindo dados vetoriais do mapeamento antigo sobre uma nova imagem. Talvez a grande aplicação, contudo, possa estar dentro da utilização da imagem "raster" dentro dos sistemas de informações geográficas. Segundo THORPE (1993), além de ser um produto barato comparado aos mapas de linha, a fotografia apresenta-se mais compreensível e legível para os usuários. Porém, há algumas desvantagens quanto aos problemas com o armazenamento dos arquivos, considerando diferentes direções de uso, como o armazenamento de cada quadrícula em um arquivo separado ou em múltiplas definições.

Porém, com o advento da tecnologia "raster", abriram-se novos caminhos, pelos quais a opinião do profissional torna-se a base para os dados oficiais, porque os computadores modernos podem manusear uma grande quantidade de dados. Ainda, são mais baratos do que a base de dados vetoriais e as precisões são semelhantes, sendo que, numa imagem fotográfica, mais detalhes são visíveis e interpretáveis do que uma base de dados vetoriais que oferece conteúdos limitados. O princípio da obtenção de ortofotos digitais é mostrado na figura 5.2.

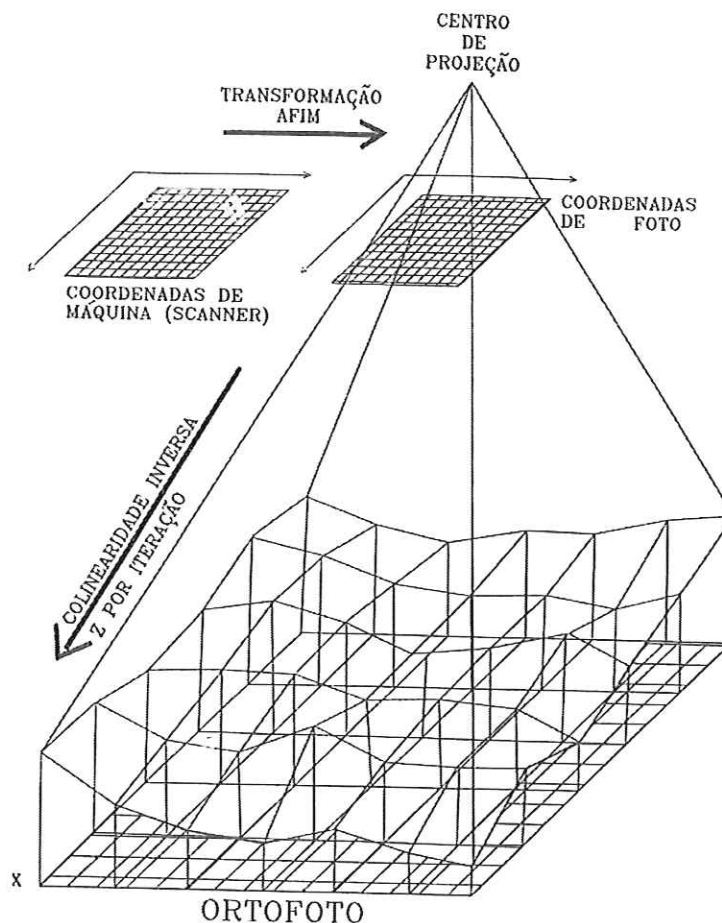


Figura 5.2 – Ortofotos Digitais

Para gerar a matriz dos valores de cinza da imagem original é necessário numerizar a referida fotografia. Os instrumentos numerizadores mais comuns permitem obter imagens com tamanho de pixels que variam de 0,005 mm até 0,4 mm. EHLERS apud WIESEL (1991), diz que as aberturas menores que 0,02 mm somente aumentam a quantidade de informação armazenada, sem o conseqüente aumento da resolução, pois, para as fotografias obtidas com câmaras fotogramétricas e digitalizadas em um Optronics P1700, por exemplo, as resoluções menores possuem somente ruídos. A tabela 4 apresenta a quantidade de dados armazenados em função do tamanho do pixel.

TABELA 4 - Quantidade de dados conforme tamanho do pixel

Pixel (mm)	Quantidade (MB)
0,0125 X 0,0125	323
0,02 X 0,02	126
0,025 X 0,025	81
0,05 X 0,05	20
0,1 X 0,1	5

Fonte: WIESEL (1991)

As ortofotos digitais possuem arquivos de tamanhos variáveis em função da resolução da imagem e da resolução desejada para a ortofoto, como podemos observar na Tabela 5.

TABELA 5 - Tamanho do arquivo em função da Resolução

Resolução (dpi)	Tamanho Arquivo (Mb)
200	15
300	34
400	60
500	91
600	136

Fonte: Helava, (1994)

Os arquivos de ortofotos podem passar pelos processos de compressão de dados, obtendo-se assim, arquivos com tamanhos bastante reduzidos em relação aos tamanhos originais. Estes processos de compressão geram uma perda de informações que varia de acordo com o processo e o índice de compressão. Dependendo do processo e do índice de compressão isto pode ser bastante interessante. Usando-se o JPEG, o dispositivo de

compressão disponível no SOFTWARE SOCET SET BY HELAVA, com índice de 75%, um arquivo de aproximadamente 82 Mb torna-se em um novo arquivo com o tamanho aproximado de 10 Mb (Helava 1994).

É necessário analisar o tamanho do pixel requerido para a confecção de cada ortofoto, pois, segundo WIESEL (1991) os custos aumentam na proporção em que aumentam os dados. Por exemplo, se desejarmos confeccionar uma ortofoto com uma ampliação de 1:2,5, o tamanho do pixel terá a mesma proporção. Veja a Tabela 6.

TABELA 6 - Ampliação de uma fotografia para ortofoto

Fotografia (mm)	Ortofoto (mm)
0,1	0,25
0,05	0,125
0,025	0,063
0,02	0,05

Fonte: WIESEL (1991)

CAPÍTULO 6

EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA UTILIZADOS NESTE TRABALHO

6.1 - Equipamentos

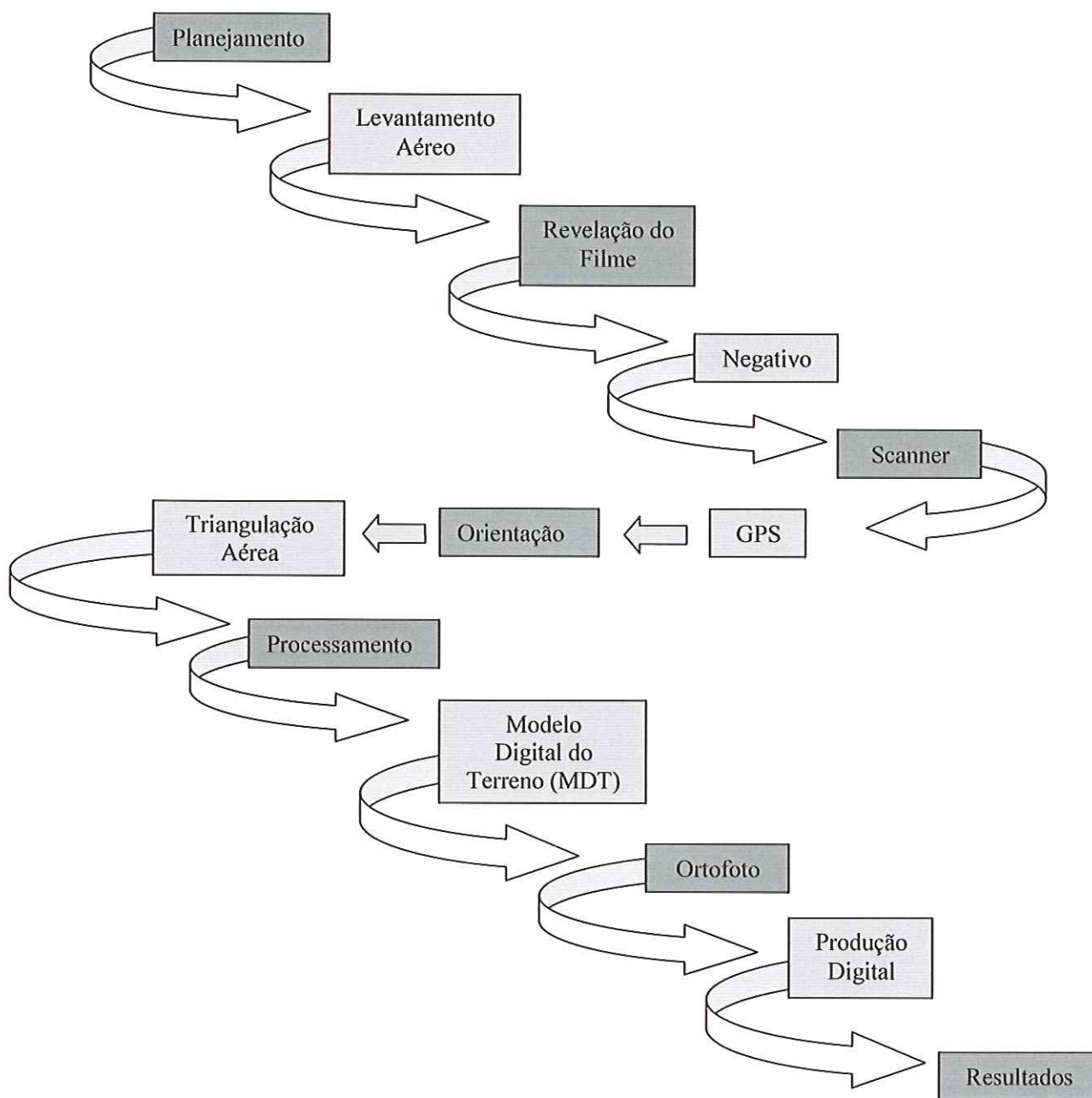
No desenvolvimento deste trabalho foram usados os seguintes equipamentos:

- ✓ Um Receptor GPS de fabricação da Leica Geosystem, modelo *SR530*, dupla frequência, Tempo Real, precisão de 1 centímetro para planimetria e 2 cm para altimetria. Este equipamento foi utilizado para o levantamento de pontos para comparar com os pontos gerados automaticamente pelo restituidor fotogramétrico digital;
- ✓ Receptor GPS, SR 9400, uma frequência, precisão de 5mm + 1 ppm na linha de base. Este equipamento foi utilizado para o levantamento dos pontos de apoio para a orientação dos modelos estereoscópicos;
- ✓ Imagens digitais na escala 1:8000 da cidade de São Carlos. Vôo realizado em 1998;
- ✓ SOFTWARE fotogramétrico SOCET SET, desenvolvido pela Leica Geosystem.

6.2 – Metodologia

O fluxograma abaixo mostra as etapas fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Fluxograma das etapas da Fotogrametria Digital para realização deste trabalho



Observando o fluxograma acima é possível observar que nem todas as etapas foram realizadas neste trabalho, porque são etapas realizadas em tempos distintos. As etapas do planejamento do vôo até o scanner foram realizadas pela empresa Aeroconsult, de Florianópolis – Santa Catarina. Este trabalho se ocupa da etapa GPS em diante.

6.2.1 – ETAPAS PRELIMINARES PARA A REALIZAÇÃO DESTE TRABALHO

Algumas etapas preliminares foram indispensáveis para a compreensão e execução deste trabalho: 1) a realização da revisão bibliográfica, principalmente para a familiarização dos conceitos fundamentais de GPS e Fotogrametria Digital, que são os dois assuntos relevantes nesta pesquisa, 2) a análise da área piloto, que pode ser visto na figura 6.1, 3) e a realização de exercícios práticos para treinar o uso do equipamento GPS, o processamento dos pontos de controle e o uso no sistema fotogramétrico, especificamente no programa SOCET SET.



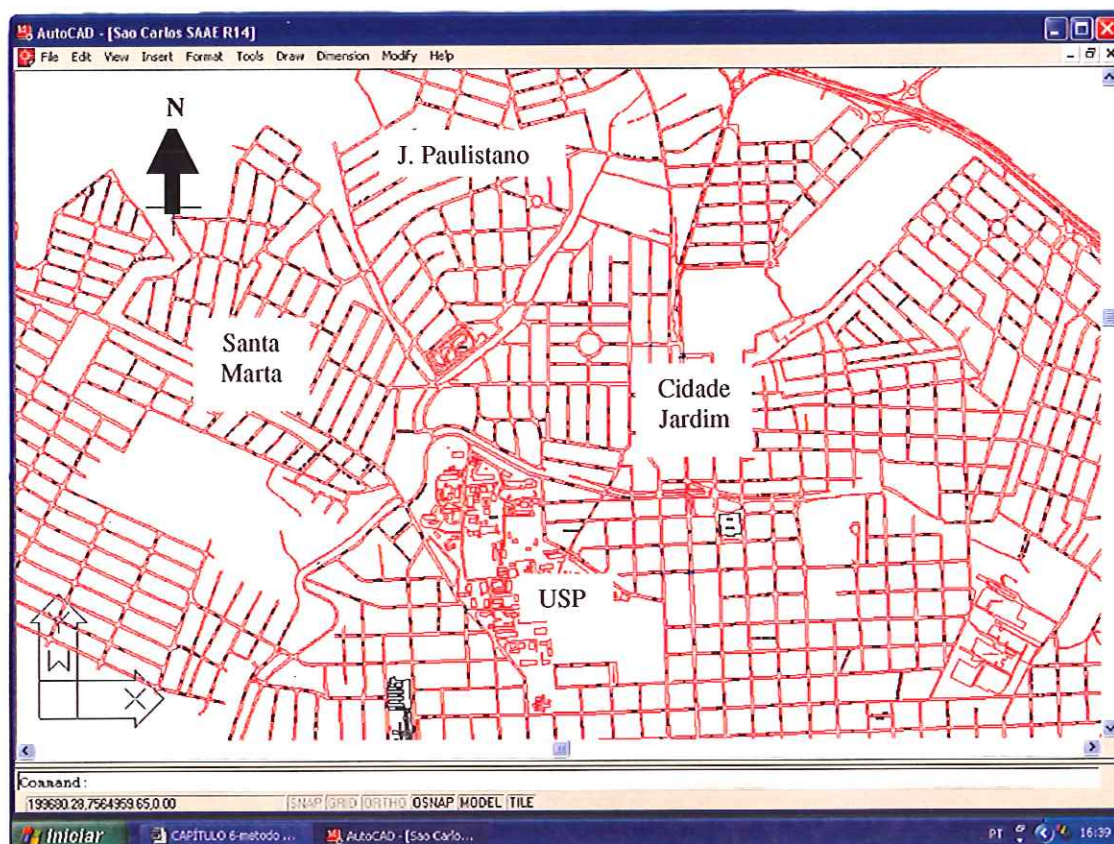


Figura 6.1 – Área Piloto

6.2.2 – ETAPA DO MÉTODO ESTÁTICO (ME)

A etapa prática para o desenvolvimento deste trabalho iniciou-se com o levantamento de pontos de apoio, com o método estático, para a orientação dos modelos estereoscópicos envolvidos na fotogrametria digital. Neste estágio uma das antenas GPS SR 9400 foi instalada no ponto de referência com as coordenadas conhecidas (em cima da caixa d'água do STT – EESC – USP), que podem ser vistas no quadro abaixo.

Coordenadas geodésicas do ponto de referência no elipsóide WGS - 84	
Latitude	22°00' 17,78425" S
Longitude	47°53' 57,02520" W
Altura geométrica	822,050 m

A outra antena GPS SR 9400, que é necessária para formar o vetor entre o ponto de referência e o ponto a ser calculado, foi instalada em 25 pontos, que foram escolhidos de maneira que se fizesse uma rede triangular sob os dois modelos estereoscópicos, pois a qualidade da orientação absoluta de um modelo fotogramétrico é em função da distribuição dos pontos no par de fotos.

Os pontos, primeiramente, foram processados no elipsóide WGS-84, que é a referência do sistema GPS, e posteriormente, foram transformados para o elipsóide SAD-69. A Tabela 7 apresenta as características destes elipsóides.

TABELA 7 – Características dos elipsóides WGS-84 e o SAD-69

Operador	Semi-eixo maior (a) – m	Semi-eixo menor (b) – m	f achatamento	e excentricidade
WGS-84	6378137	6356752,314	1 / 298,257223563	0,08181918994
SAD-69	6378160	6356774,719	1 / 298,25	0,0818201799

Fonte Segantine (1995)

O período em que a constelação de satélites na cidade de São Carlos apresentou melhor geometria, foi entre 15 horas de um dia até às 10 horas do dia seguinte. A maior parte do levantamento estático aconteceu a partir das 15 horas.

O tempo de observação dos satélites foi de 20 minutos e no pós - processamento a precisão dos vetores entre o ponto de referência e o ponto escolhido ficou na ordem de dois milímetros. O vetor de maior distância foi de 1400 m.

6.2.3 – ETAPA DO MÉTODO CINEMÁTICO EM TEMPO REAL (MC)

No levantamento dos dados de campo com o receptor GPS em Tempo Real buscou-se coletar elementos que possibilitassem a modelagem adequada do terreno (pontos e linhas de quebra) para que se tornasse possível à comparação destes pontos com os pontos gerados automaticamente no restituidor fotogramétrico.

A figura 6.2, mostra a controladora do SR 530 RTK. É importante mostrar alguns detalhes para a compreensão da configuração do equipamento, já que é no visor da controladora do equipamento que se acompanha a qualidade do levantamento. O usuário do equipamento deve manter constante atenção, pois o mesmo equipamento informa constantemente a situação da constelação dos satélites, o número de satélites rastreados, quantos satélites o receptor está observando com a fase da portadora L1 e L2, respectivamente, também mostra a resolução da ambigüidade e a precisão tridimensional do ponto em questão.

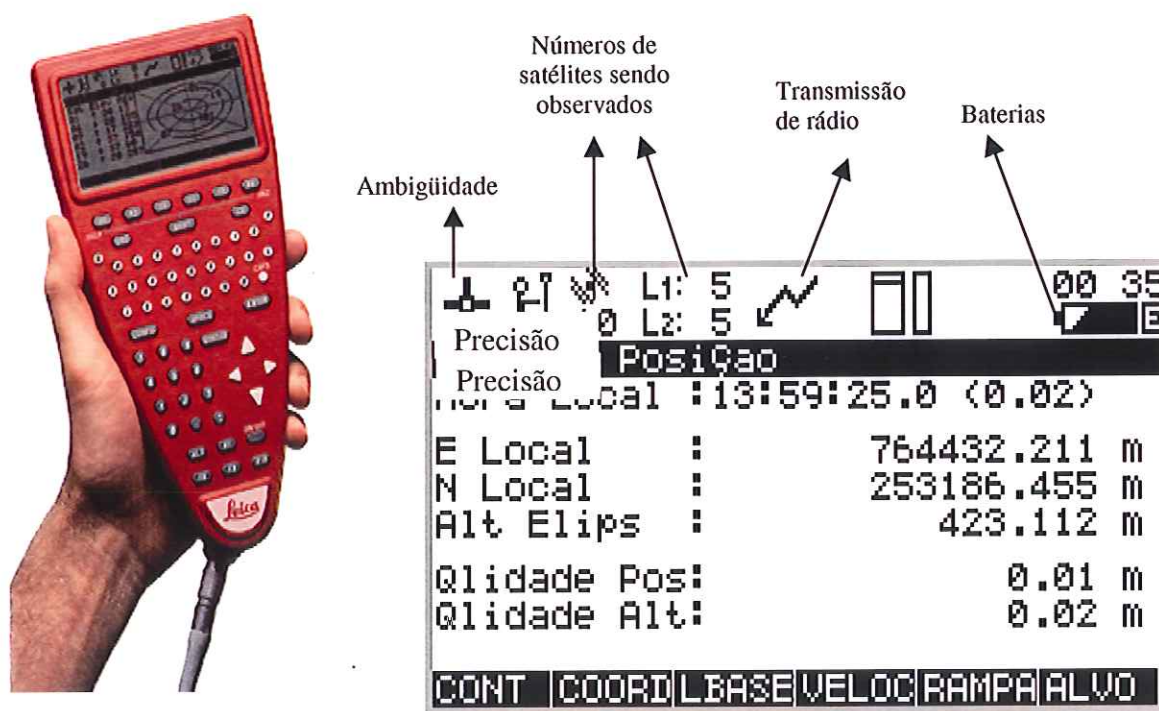


Figura 6.2 – Controladora do Receptor SR 530 RTK

No ponto de referência, foi instalado um dos receptores SR 530 RTK. Acoplado via cabo a uma estação de transmissão de rádio. Ambos foram instalados no topo da caixa d'água do departamento de transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, como pode ser visto na figura 6.3.

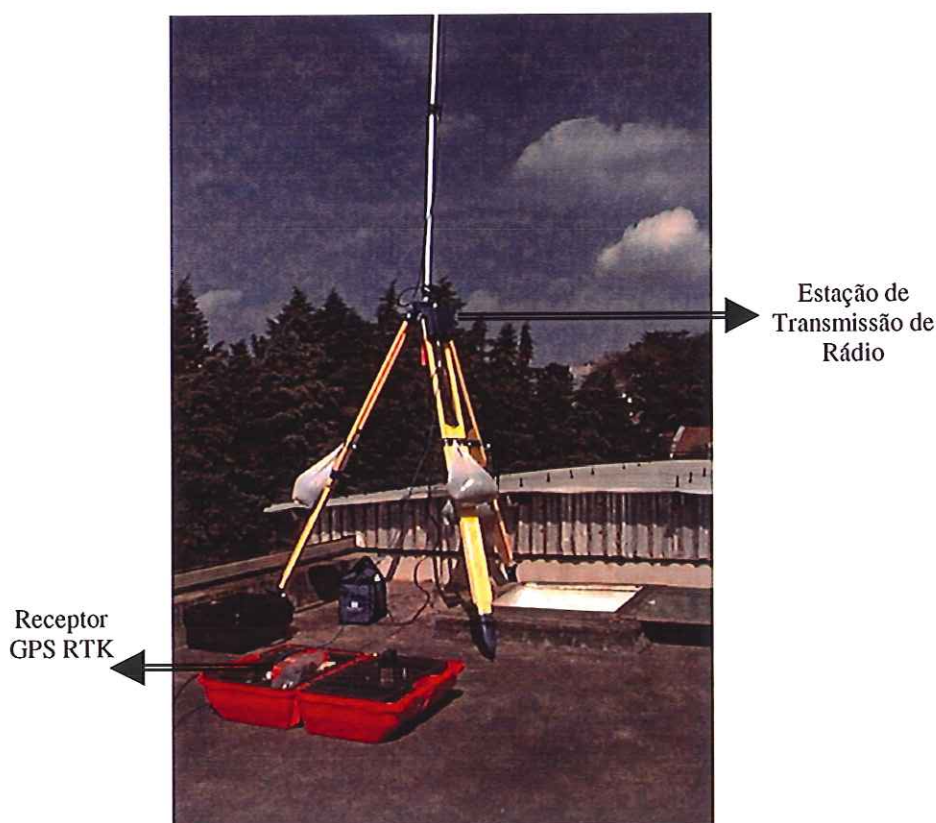


Figura 6.3 – Estação emissora do sinal GPS RTK

No período da realização do levantamento, houve a transição das coordenadas do ponto de referência do departamento de transportes, pois, atualmente existe a estação ativa da antena GPS AT 303, com o sensor SR 9500, dupla frequência, que torna possível observar as medições 24 horas via internet. Assim sendo, o ponto de referência sofreu alterações em suas coordenadas. Para o levantamento em tempo real as coordenadas utilizadas foram as que podem ser vistas no quadro abaixo.

Visando uma melhoria na utilização do sistema GPS, pelos alunos da instituição de áreas afins e a comunidade em geral é que o Departamento de transporte migrou para uma antena GPS ativa. Com isso, qualquer usuário da região tem acesso aos dados da antena BASE GPS.

Coordenadas geodésicas do ponto de referência no elipsóide WGS-84	
Latitude	22°00'17,80085" S
Longitude	47°53'56,99582" W
Altura geométrica	824,70 m

No MC RTK, em locais em que eram necessários detalhes específicos, como os taludes e superfícies planas, o equipamento foi configurado para armazenar dados automaticamente a cada 10 metros. Porém, nos bairros, foram coletados pontos somente nos cruzamentos das vias, representando uma malha com as dimensões dos quarteirões.

6.2.4 – ETAPA NO RESTITUIDOR FOTOGRAMÉTRICO

Com os pontos estáticos processados, as fotografias aéreas digitalizadas (capturadas no scanner) e o certificado da calibração da câmara fotogramétrica foi possível iniciar o trabalho no restituidor fotogramétrico que utiliza o sistema digital SOCET SET produzido pela Leica Geosystem.

Foram importadas para o restituidor fotogramétrico digital 4 imagens no formato 23cm x 23cm, escala 1:8.000, com a resolução do pixel de 28 microns. Essas imagens formaram 2 modelos estereoscópicos.

No sistema fotogramétrico digital realizou-se a orientação interna automática. Em seguida, realizou-se a orientação relativa, para a qual, escolheu-se uma distribuição dos pontos fotogramétricos de acordo com modelos de distribuição disponíveis no programa SOCET SET. Posteriormente, os pontos de controle foram importados para o sistema e medidos pelo operador. Logo que o sistema processa a transformação das

coordenadas da câmara nas coordenadas terrestres geram-se resíduos, que devem ser analisados pelo operador para análise de qualidade segundo o PEC (Padrões de exatidão cartográfica). Tais precisões são função da resolução da imagem digital que envolve, a resolução da câmara fotogramétrica, a resolução do pixel da imagem, a resolução radiométrica do pixel da imagem e da escala da fotografia, que envolve a altura de vôo, os movimentos tridimensionais e a velocidade da aeronave.

Ao se ter considerado bons os resultados das orientações, gerou-se automaticamente o modelo digital do terreno. Neste momento, é possível a comparação de pontos escolhidos no modelo fotogramétrico com os coletados diretamente no campo com o receptor GPS RTK. A comparação deu-se com o modelo digital do terreno editado. Na figura 6.4 se podem ver as curvas de nível com o MNT editado. A comparação entre a altura geométrica dos pontos das áreas não edificadas como no campo de futebol da Escola de Engenharia de São Carlos pode ser sob o modelo digital não editado. Já nos quarteirões edificadas somente é possível a comparação dos pontos sob o modelo editado, porque ao gerar um MNT automático, o sistema considera um quarteirão como um bloco de edificações, modificando o relevo do terreno. Portanto, existe a necessidade de se fazer edição.

No sistema SOCET SET, a edição do MNT compreende em selecionar com o cursor, prendê-lo, e, com a visão estereoscópica, conduzi-lo ao terreno, fazendo com que o modelo digital aproxime-se o mais próximo da superfície do terreno.



Figura 6.4 – Curvas de Nível com o MNT editado

CAPÍTULO 7

RESULTADOS

7.1 - Introdução

Neste capítulo trata-se dos resultados obtidos com o desenvolvimento das etapas descritas no capítulo anterior. Os resultados estão ligados diretamente aos equipamentos disponíveis e à infra-estrutura encontrada no Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos - USP-SP.

7.2 – Resultados obtidos com o método estático

Os pontos de controle obtidos foram transformados para o sistema de referência SAD-69, utilizou-se o sistema de projeção UTM com o meridiano central 45° . A altura considerada foi a elipsoidal ou também conhecida como a altura geométrica. Estes parâmetros foram escolhidos porque são estabelecidos conforme as especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos – IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) – 1983. A tabela 8 apresenta os resultados dos pontos de controle obtidos no campo.

**TABELA 8 - Pontos de controle obtidos na Projeção UTM,
no sistema de Referência SAD-69**

Ponto	P	N (m)	Altura Elipsoidal (m)
1000	200069,10	7563351,73	791,57
2000	200059,32	7563357,59	791,82
3000	200119,20	7563492,72	800,35
4000	201571,23	7563630,67	845,04
6000	201538,57	7564415,00	842,57
7000	201207,97	7564493,23	824,71
8000	201404,87	7564206,56	834,67
9000	201464,69	7565112,60	823,15
10000	200835,92	7565026,88	829,29
12000	200087,29	7564591,66	827,33
13000	200351,47	7564079,02	814,51
14000	200568,63	7564138,95	798,80
15000	201264,92	7563933,43	814,66
16000	201957,19	7563887,28	826,97
17000	200756,60	7563629,89	826,13
18000	201278,58	7563228,81	854,42
19000	201995,70	7563258,82	858,17
20000	201544,43	7564338,44	843,18
21000	200029,37	7564879,31	827,79
23000	200190,14	7563448,28	790,13
24000	200761,71	7563599,74	830,07
25000	201476,66	7565053,53	826,34

Os pontos 5000 e 11000 não estão listados, pois não ficaram bem definidos na fotografia aérea digital. O levantamento dos pontos de apoio não se deu no mesmo período em que foi realizado o levantamento dos pontos o receptor GPS RTK. A boa distribuição dos pontos de controle pode ser observada na triangulação sob o modelo estereoscópico, que pode ser visto na figura 7.1.

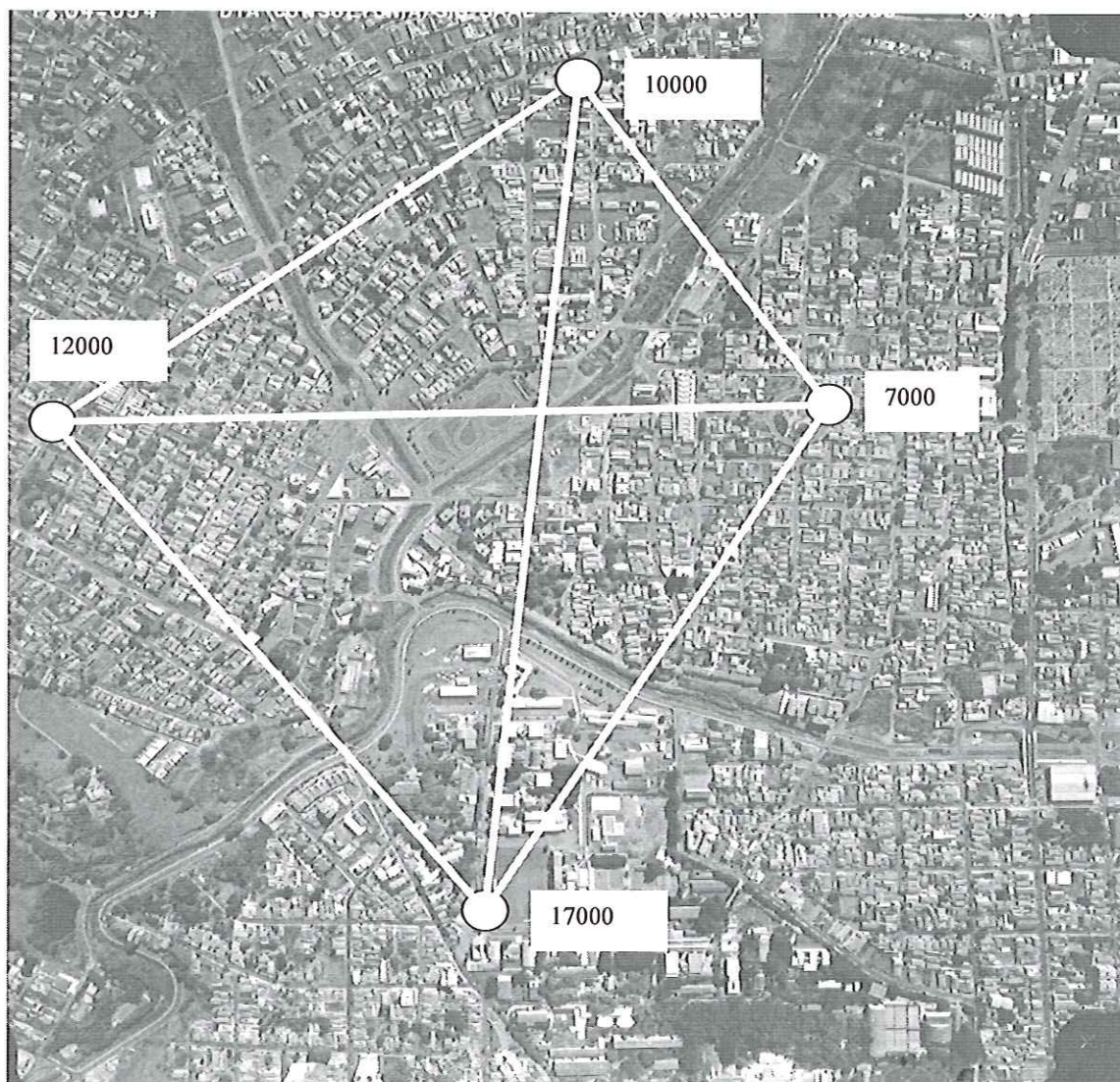


Figura 7.1 – Triangulação dos Pontos de Controle no Modelo Estereoscópico

7.3 – Resultados obtidos no campo com o método cinemático RTK

Para este trabalho foram coletados vários pontos, caracterizados por suas coordenadas XYZ. A precisão desses pontos variou entre 1 a 5 cm na planialtimetria. A Tabela 9 apresenta o tempo gasto com todo o procedimento para a coleta dos dados.

TABELA 9 – Levantamento com o sistema RTK

Data	Horário	Discrição
10/05/01	9:00 às 11:00	Configuração do terminal do sistema RTK
11/05/01	9:00 às 16:00	Levantamento interno da Escola de Engenharia de São Carlos
25/05/01	9:00 às 17:00	Término do levantamento interno da Escola de Engenharia de São Carlos
04/06/01	9:00 às 12:00	Levantamento do Bairro Cidade Jardim e Paulistano
05/06/01	8:00 às 11:00	Levantamento do Jardim Santa Marta
18/06/01	13:00 às 18:00	Córrego canalizado à frente a EESC-USP

OBS: Todos os dias, após o término do levantamento, foram utilizados 15 minutos para descarregar os dados coletados e realizar os ajustes necessários como: datum de referência, tipo de coordenada (geodésicas, cartesianas, plano retangulares) e a exportação do arquivo de dados ASCII. Foram coletados 1240 pontos.

Analisando-se a Tabela 9 verificou-se a rapidez do levantamento em meio urbano com o uso do sistema de posicionamento com o receptor GPS em Tempo Real, pois é muito comum a perda da resolução da ambigüidade. Como a correção é em tempo real, basta permanecer no ponto poucos minutos ou ainda segundos, para que novamente o sistema resolva a ambigüidade.

Para coletar 1240 pontos foram necessárias 28 horas, sendo que, em outros métodos, não em tempo real, dependeria se o receptor GPS mantivesse observando continuamente os mesmos satélites e com aproximadamente a mesma característica

física do sinal, pois o receptor GPS deve observar no mínimo 4 satélites simultaneamente. Perdendo, entretanto, esse contato, pode-se esperar até 15 minutos para resolver a ambigüidade novamente, esse é um fato que acontece no levantamento estático com o sensor GPS 9400 ou o levantamento stop and go, são exemplos que demoram a realização do levantamento de campo.

Todo os pontos levantados com o receptor GPS em tempo real foram obtidos com precisão inferior a 2 cm na planimetria e a 4 cm na altimetria.

O levantamento no campo com o RTK deu-se em várias etapas. Para o planejamento do levantamento de campo, definiu-se data e local para se adequar com a disponibilidade do equipamento RTK, que foi cedido pela empresa Comercial e Importadora Wild Ltda.

7.4 – Resultados obtidos no Restituídor Fotogramétrico Digital

A área piloto destinada ao trabalho apresenta uma região com densidade média de edificações, o que facilitou as observações da variação da qualidade do modelo digital, gerado automaticamente pelo sistema fotogramétrico digital.

Foram necessários definir-se outros pontos de controle para a orientação absoluta dos modelos fotogramétricos, que influenciaram na qualidade dos resultados, foram somente processados, não fazendo parte da rede de triangulação dos demais pontos de controle. Estes são a partir do 15000.

Com a orientação dos modelos estereoscópicos digitais realizou-se o MDT com os pontos gerados automaticamente do sistema fotogramétrico SOCET SET e comparou-se com os pontos coletados com o receptor GPS RTK que foram importados no mesmo sistema. Esta comparação gerou um resultado que não foi satisfatório, pois, a diferença entre os pontos ficou na média de 2 m.

A partir da insatisfação com estes resultados, partiu-se para as análises das possíveis causas dessa diferença. Essa diferença entre os resultados somente pode ser encontrada se houver problemas nos pontos de controle e ou nos pontos coletados com o GPS RTK. Então, ao se retornar ao campo para confirmar os pontos de controle,

observou-se que as coordenadas da base de referência não se mantiveram constantes para todo o levantamento de campo, ou seja, variou a posição da base durante as observações dos pontos de controle e os pontos observados com o GPS RTK, pois, como já foi dito, houve uma transição nas coordenadas do ponto de referência. Assim, fez-se novamente uma coleta de 157 pontos com o receptor GPS RTK e realizou-se o processo de orientação, geração do MNT e compararam-se os resultados novamente.

Para se ter certeza de que o modelo estereoscópico digital estava correto, orientou-se os modelos fotogramétricos, gerou-se novamente o modelo digital do terreno automaticamente. A partir disso, repetiu-se à importação dos dados do GPS RTK e fez-se a comparação entre os dados.

A Tabela 10 abaixo a comparação de uma amostra de 20 pontos levantados com o receptor GPS RTK e os mesmos 20 pontos medidos sob o modelo gerado automaticamente no programa SOCET SET. Esses 20 pontos coletados com o GPS RTK estão localizados em alguns cruzamentos de vias dos quarteirões dos bairros escolhidos e são visíveis na fotografia.

TABELA 10 – Comparação das alturas geométricas entre 20 pontos obtidos no restituidor fotogramétrico e o GPS RTK

	Ponto GPS RTK	Ponto Automático
1	821,78	821,47
2	818,20	818,22
3	810,37	810,34
4	805,09	805,03
5	802,23	802,15
6	802,14	802,07
7	823,51	823,47
8	832,92	832,85
9	829,14	829,02
10	824,88	824,93

	Ponto GPS RTK	Ponto Automático
11	807,88	807,65
12	808,35	808,24
13	830,10	830,22
14	823,55	853,38
15	821,46	821,32
16	809,93	809,81
17	810,22	810,34
18	807,21	807,04
19	828,73	828,56
20	805,76	805,54

Observando a tabela acima, verifica-se qualidade dos valores obtidos pela comparação das alturas geométricas levantadas como o GPS RTK e as geradas automaticamente pelo sistema fotogramétrico digital, isso possibilitou afirmar que a geração automática de pontos altimétricos satisfaz as especulações dos profissionais que trabalham com medidas de altura da terra.

Esses resultados da Tabela 10 atenderam as expectativas, pois, esperava-se que a diferença entre os dois métodos de coleta de dados altimétricos, o GPS RTK e o sistema Fotogramétrico Digital, não ultrapassasse a 20 cm entre as alturas geométricas, esse valor foi estipulado considerando os erros já conhecidos da fotogrametria digital, como as orientações dos modelos fotogramétricos, a escala da fotografia e ações do scanner para obtenção da fotografia digital.

Neste trabalho para minimizar os erros da câmara fotogramétrica, a posição do vôo no momento de tiragem da fotografia, a escala da mesma e os erros do scanner, gerou-se o processo de ortofoto da área de estudo - que pode ser vista no anexo B, dando plena qualidade do resultado final deste produto. A figura 7.2 exemplifica a utilidade de uma ortofoto.



Figura 7.2 – Finalidade da realização de Ortofotos

Neste trabalho realizou-se a ortofoto para deixar evidenciada a importância de realizar esse tipo de processo em fotografias aéreas, pois, somente é possível a elaboração de mapas, restituições, atualizações de informações geográficas com as correções das fotografias, minimizando-se erros grosseiros, comuns nestes tipos de produtos.

O campo de futebol da Escola de Engenharia de São Carlos medido com trena obteve-se as medidas 100,60 m x 69,70 m e sendo as medidas feitas sobre a ortofoto as foram 100,65 m x 69,75 m. Não se realizando o processo de ortofoto as diferenças são maiores, que variam muito dependendo do processo de coleta das medidas, sendo as medidas feitas antes de realizar a ortofoto foi de 101,10 m x 70,05 m.

7.5 – Dificuldades encontradas no levantamento dos pontos de controle

Os obstáculos encontrados para coleta de dados de campo para os pontos de controle fotogramétrico, com o receptor GPS SR 9400 foram: a falta de disponibilidade de um técnico para o apoio no levantamento, a variação das coordenadas do ponto BASE do departamento de transportes durante a coleta dos dados, a inexperiência no uso do Software de processamento, o SKI PRO, neste as maiores dificuldades se deram na análise e interpretação dos resultados.

7.6 – Observações no campo com o receptor GPS RTK

Na configuração do GPS RTK e no momento da realização do levantamento de campo com o MC RTK, foi possível observar alguns detalhes que são fundamentais e que caracterizam o sistema:

- ✓ O ganho de tempo de trabalho, quando o receptor é configurado com antecedência;
- ✓ A observação da configuração dos satélites (status) leva menos de 15 segundos no campo pelo receptor;
- ✓ A resolução da ambigüidade é avisada por um sinal sonoro ao operador, e quando a mesma não se resolve, o operador é avisado da mesma forma;
- ✓ Com status de 6 satélites, observando-se as portadoras L1 e L2, simultaneamente, a precisão é na ordem de 1 cm na planimetria e 2 cm na altimetria;
- ✓ Já com status de 4 satélites, observando-se as portadoras L1 e L2, simultaneamente, a resolução da ambigüidade se mantém. A precisão é da ordem de 6 cm na planimetria e 12 cm na altimetria;
- ✓ O maior tempo de espera para resolver a ambigüidade ocorre quando o status dos satélites é diferente, observando as portadoras L1 e L2, ou seja, observando-se a portadora L1 com 6 satélites e a Portadora L2 com 4 satélites. Quando essa

diferença for maior que 2 satélites, a resolução da ambigüidade normalmente leva mais tempo;

- ✓ Para coletar pontos que definissem a superfície do terreno optou-se nos locais, onde a superfície fosse regular, pela geração automática disponível no GPS SYSTEM 500, isto é, a configuração do equipamento de maneira que este gravasse um ponto a cada 10 m;
- ✓ A grande vantagem do levantamento dos pontos se deu nas áreas urbanas, nos cruzamentos das vias, já que na cidade existem muitos obstáculos;
- ✓ No levantamento do Córrego canalizado na frente da Escola de Engenharia de São Carlos, sito à Avenida Trabalhador Sãocarlense, para que fosse definida a forma adequadamente fez-se o levantamento na borda superior, depois no fundo do córrego, com precisão na ordem de 3 cm na planimetria e 5 cm altimetria.

7.7 – Dificuldades encontradas no sistema fotogramétrico

O desenvolvimento do trabalho no sistema fotogramétrico deu-se em dois períodos de tempo, pois, na primeira etapa depois da orientação dos modelos e da geração automática do MNT, verificou-se a incompatibilidade dos dados do sistema fotogramétrico com os obtidos no campo com o GPS RTK, devido a nos erros nos dados. A diferença entre as alturas geométricas estava em torno de 2 metros.

A maior dificuldade para o início do trabalho no sistema fotogramétrico deu-se no certificado de calibração da câmara fotogramétrica, pois esta não estava compatibilizando com a câmara utilizada na realização do vôo fotogramétrico, do qual, as fotografias aéreas foram utilizadas neste trabalho, com isso, precisou uma busca intensiva na internet para confirmar os parâmetros da câmara.

O processamento dos dados no sistema fotogramétrico é extremamente rápido. A demora se dá na orientação dos modelos fotogramétricos, devido o ajustamento dos resultados.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.

8.1 – Análise dos resultados

Para se tornar possível os resultados da Tabela 11, são necessários se obter resultados com qualidade em todo o processo de obtenção dos dados de campo e processamento da imagem no sistema fotogramétrico digital.

Verificou-se o erro médio de 2 metros quando se fez a primeira comparação altimétrica entre os dados de campo e os obtidos no sistema fotogramétrico, isso se torna claro que todas as etapas são fundamentos para o desenvolvimento de todo o processo.

Outro detalhe identificado que ocasionou erro foi na orientação interior que se observou que o certificado de calibração era incompatível com a câmara fotogramétrica utilizada no respectivo vôo, tornando os valores extrapolados, ou seja, no resultado da orientação interior os valores eram completamente absurdos, como por exemplo 100 m de erro.

Os resultados da tabela 11 estão diretamente relacionados com os valores obtidos nas etapas parciais da metodologia proposta neste trabalho.

Como uma das finalidades da utilização do processo desenvolvido neste trabalho é para mapeamento, cabe verificar se os resultados atendem às especificações técnicas estipuladas para esse tipo de trabalho no Brasil. Feita a análise estatística dos dados obteve-se resultados que podem ser visto na Tabela 11.

A Tabela 11 foi obtida a partir do MNT automático realizado no sistema SOCET SET que se comparou com os 157 pontos obtidos com o GPS RTK. Para se tornar possível à comparação o sistema também gerou um MNT dos 157 pontos, porém que com esses pontos o sistema fotogramétrico não realiza interpolações, como acontece com o MNT que ele realiza automático, daí, a quantidade 16166 pontos analisados.

No item 7.4, a Tabela 10 apresenta uma listagem da comparação altimétrica entre 20 pontos, que foram escolhidos e medidos pelo operador diretamente sobre o MNT. Pode-se observar nesta tabela que as diferenças não ultrapassam a 0,20 m.

TABELA 11 – Resultados obtidos por análise estatística no SOCET SET

Percentual (%)	Número de pontos	Padrão Cartográfico (m)	Erro Padrão (m)
100	16166	0,80	0,2603
99,96	16160	0,81	0,2582
96	15545	0,78	0,2600
92,5	14947	0,75	0,2598
90	14549	0,73	0,2602

Como apresenta a Tabela 11, o padrão cartográfico para 90% da amostra não ultrapassou 0,75 m e erro padrão não superou a 0,5 m, que eram os valores máximos esperados para este trabalho. Foram realizadas 5 vezes a análise estatística e o próprio software vai eliminando os pontos com maiores erros e reaplica o processo novamente.

8.2 - Conclusões obtidas neste trabalho

Como foi proposto no objetivo específico, atingiu-se o padrão de exatidão cartográfica exigida para a escala da fotografia em uso. Com isso, pode-se afirmar que os dados obtidos automaticamente, no sistema fotogramétrico digital SOCET SET, são adequados para modelar altimetricamente um determinado terreno.

Para se obter os produtos, da geração automática de pontos do sistema fotogramétrico, são indispensáveis os modelos digitais do terreno, porém, estes devem ser devidamente editados, principalmente, em áreas com edificações, pois, editando-os, os resultados atendem as expectativas dos sistemas fotogramétricos digitais.

Como os resultados foram satisfatórios, será possível elaborar muitos trabalhos finais, que atualmente, estão sendo muito procurados, como as ortofotos, pois estas são

muito úteis para: as atualizações cartográficas, a realização de novos mapeamentos e geoprocessamentos, que são utilizados em sistemas de informações geográficas.

8.3 – Recomendações para realização de trabalhos futuros

- ✓ A avaliação da restituição fotogramétrica a partir de MNTs automáticos;
- ✓ A influência da resolução radiométrica para a correlação de imagens digitais;
- ✓ Uma pesquisa estatística no Brasil para analisar o uso de sistemas fotogramétricos digitais para a elaboração de atualizações cartográficas.

ANEXOS

ANEXO A

Resumo das especificações técnicas do GPS SR530 usado nesta pesquisa

RECEPTOR	SR 530
Tipo de receptor	Dupla frequência, RTK
Modos de medição	Estático, Rápido Estático, Stop & Go Cinemático, Tempo Real On The Fly RTK (padrão) e DGPS/RTCM (padrão)
Medições L1 – 12 canais L1	Fase da portadora, códigos C/A e P
Medições L2– 12 canais L2	Fase da portadora, códigos P e P auxiliado quando sob AS
Antena	AT 502, centrada com precisão
Linhas bases (rms) pós-processamento	Precisão da posição = linha base (rms). Precisão da elevação = 2x a precisão da posição
Estático	3 mm + 0.5 ppm rms
Rápido estático	5 mm + 1 ppm rms
Cinemático	10 mm + 2 ppm rms
Somente código	30 cm rms
Linhas bases (rms) Tempo Real RTK e DGPS/RTCM	Precisão da posição = linha base (rms). Precisão da elevação = 2x a precisão da posição
Sem deslocamento após inicialização	5 mm + 2 ppm rms
Com deslocamento após inicialização	10 mm + 2 ppm rms
Somente código e DGPS/RTCM	30 cm rms
Cartões PCMCIA ATA Flash	4 MB, 10 MB, 85 MB
Memória interna opcional	4 MB, 10 MB
Exibição de coordenadas	Geográficas, Cartesianas e Locais
Modo de implantação com RTK	10 mm + 2 ppm p/ 5 Hz
Posicionamento com DGPS/RTCM	30 cm p/ 5 Hz
Programas padrão	COGO, Áreas, Linhas/ grelhas, Ponto Oculto
Programas opcionais somente para SR 530	RoadPlus, Rampa Rápida, Implantação Digital Terrain Model (DTM)

Fonte Leica Geosystems

ANEXO B

Ortofoto da área de estudo gerada a partir de fotografias na escala 1:8000,
23 cm x 23 cm



Sem escala

ANEXO C

Descrição de alguns pontos de controle

PONTO 1 (CASA BRANCA)

TRIÂNGULO ENTRE AS RUAS: AV. DR. Francisco Pereira Lopes, Rua Giácomo Casale e Rua Ângelo Passeri - Enfrente ao Restaurante Casa Branca – Bairro Jardim Alvorada – Direção USP ao SHOPPING Iguatemi.

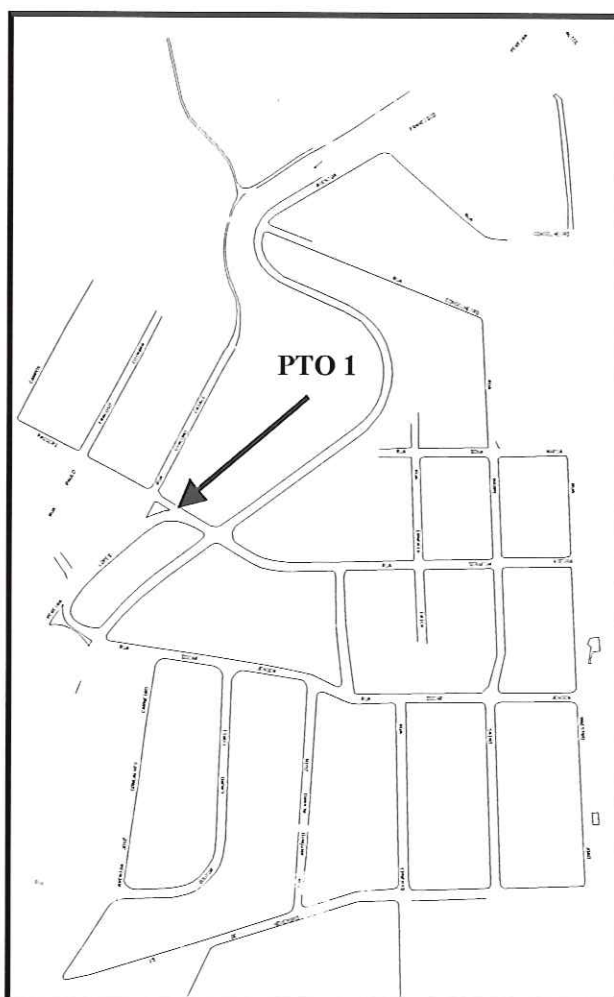


Figura 3 – Ponto 1a



Figura 4 – Ponto 1b



Figura 5 – Ponto 1c

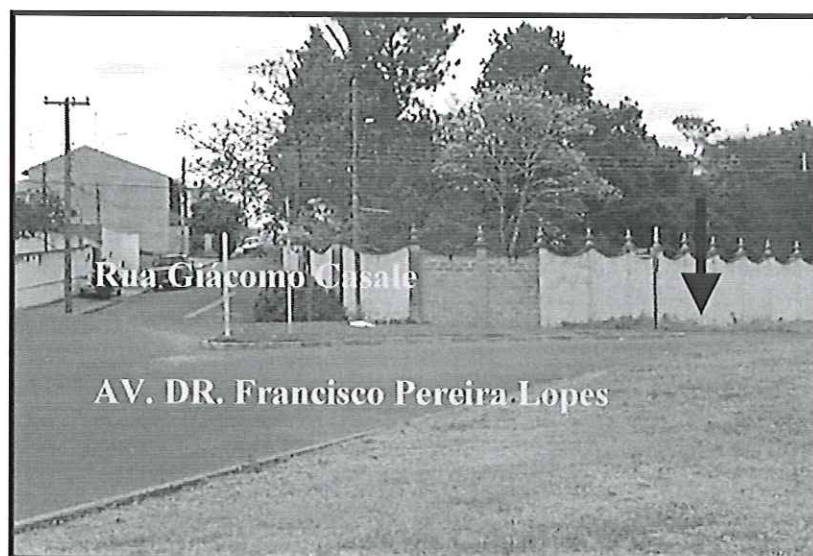


Figura 6 – Ponto 1d

PONTO 2 (RUA ADOLPHO CATTANI)

Rua Adolpho Cattani esquina com a Avenida São Carlos – Vila Laura.

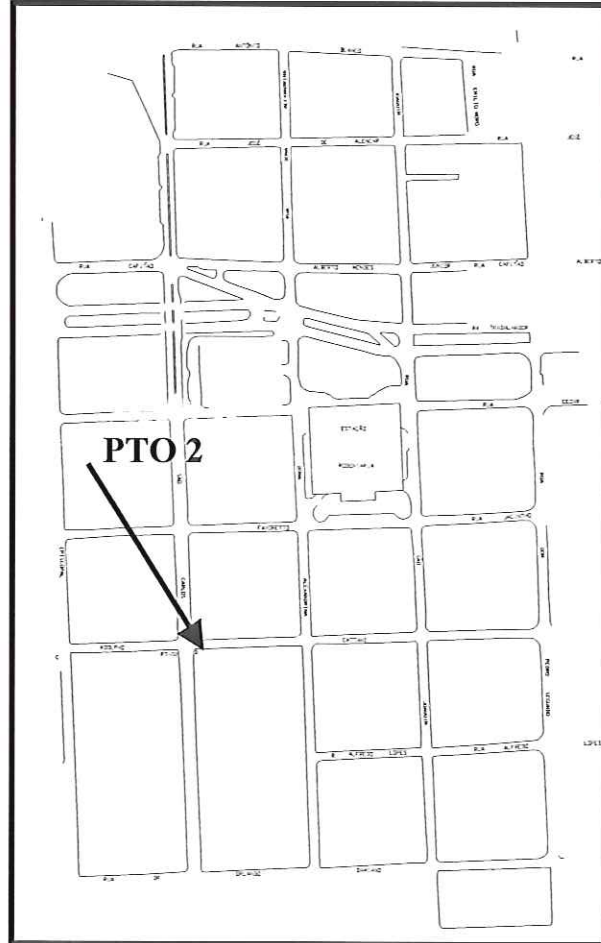


Figura 7 – Ponto 2a



Figura 7 – Ponto 2b

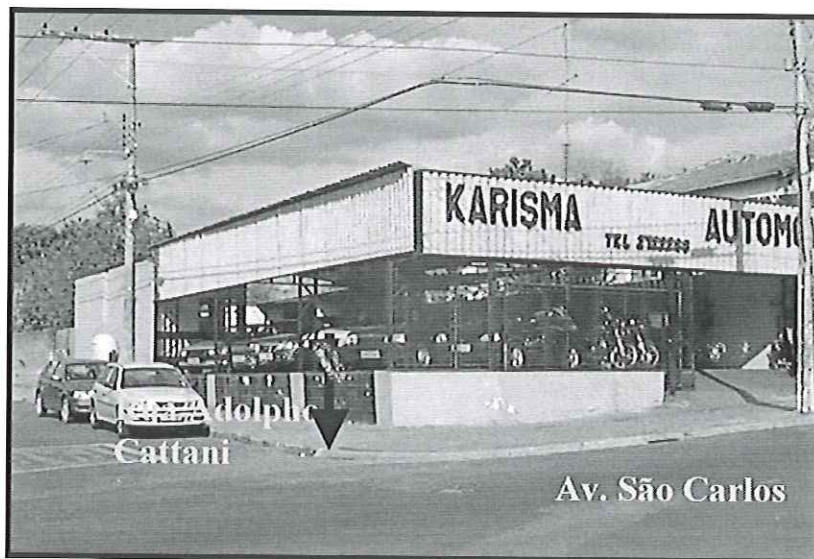


Figura 7 – Ponto 2c

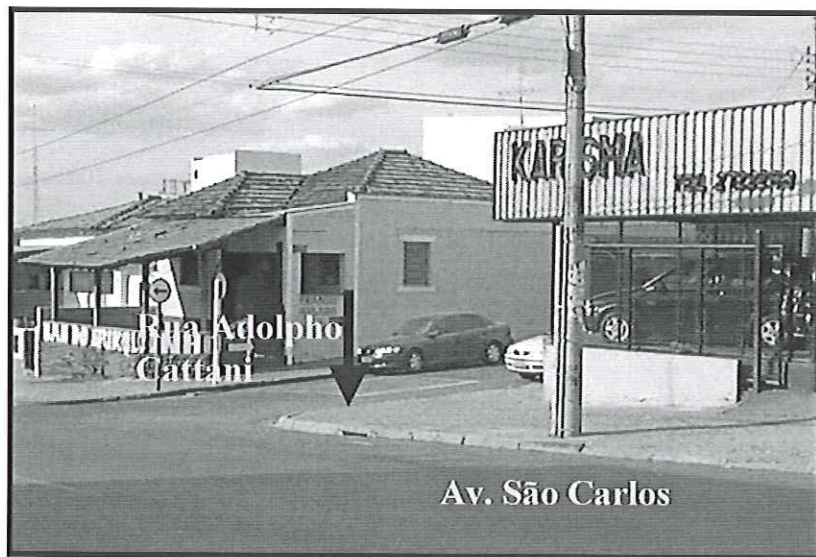


Figura 7 – Ponto 2d

PONTO 3 (CEMITÉRIO)

Rua Professor Augusto de Oliveira esquina com a Avenida Salgado Filho – Vila Laura.

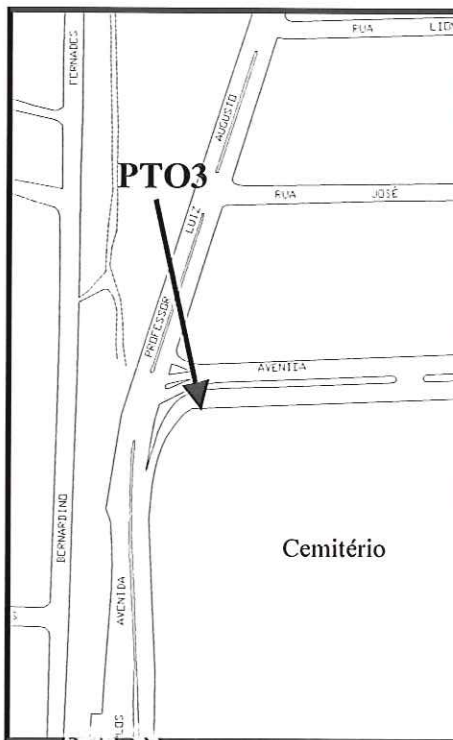


Figura 8 – Ponto 3a



Figura 8 – Ponto 3b

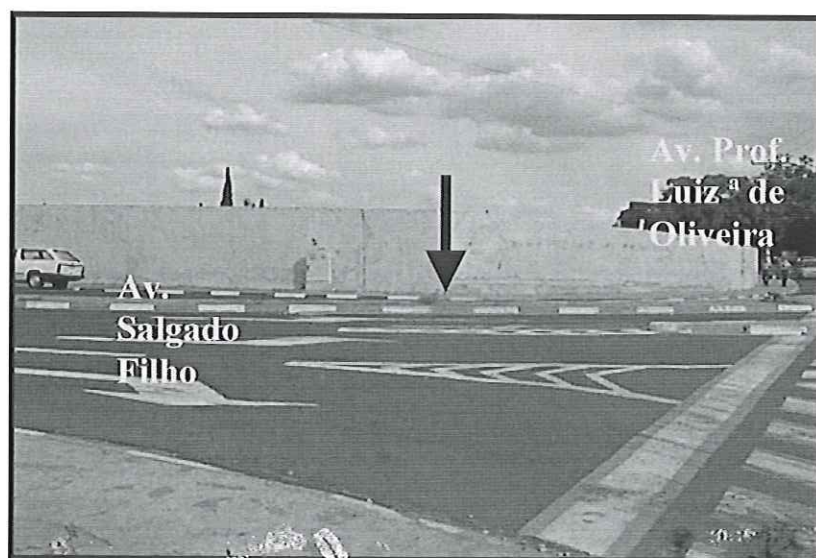


Figura 9 – Ponto 3c

PONTO 4 (PRAÇA PIZA)

Av. das Gardêneas com Rua Alameda das Hortências – Cidade Jardim

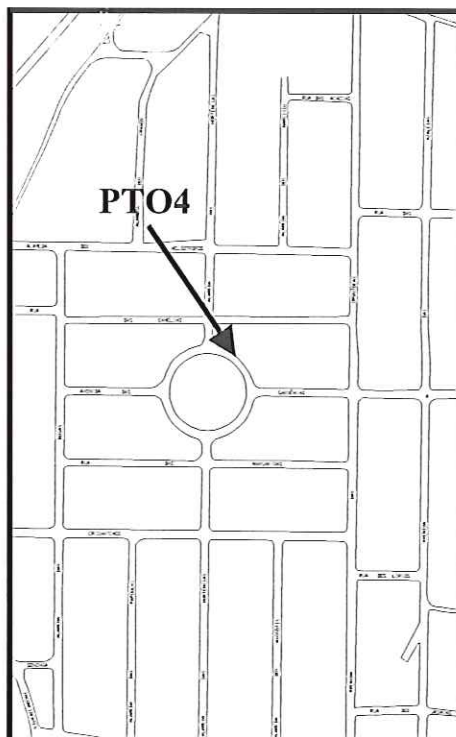
**Figura 10 – Ponto 4^a****Figura 11 – Ponto 4b**



Figura 12 – Ponto 4c

PONTO 5 (KARTÓDROMO)

Partindo da USP do lado direito

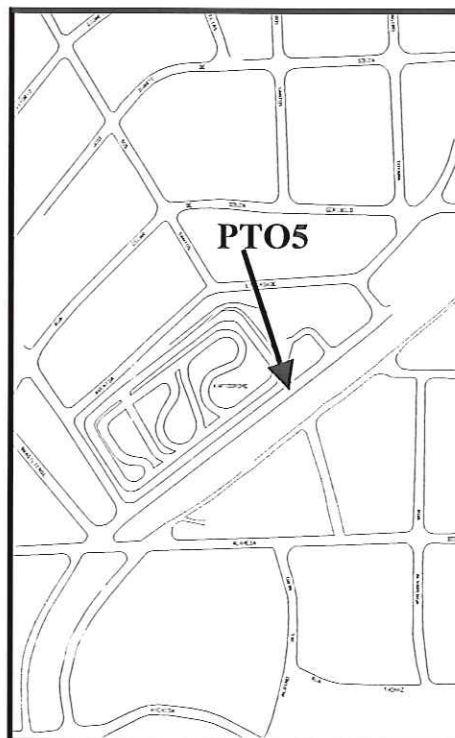


Figura 13 – Ponto 5a



Figura 14 – Ponto 5b



Figura 15 – Ponto 5c

BIBLIOGRAFIA

1- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, VALTHER. (1993). *Ortofoto Digital, Uma Solução do Futuro, já?*. Curitiba – PR. Fator GIS, (nº 2), Sagres Editora.

ALMEIDA, JAIR F.(1989). *Ortofoto Digita*. UFPR, Curitiba – PR. Dissertação do Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas.

ANDRADE, J. BITTENCOURT. (1998). *Fotogrametria*. Curitiba, SBEE.

ARAÚJO, SUZANE TRINDADE. (1991). Modelagem tridimensional de objetos cartográficos por estruturas octree e triangulação espacial. 223 p. Dissertação (Mestrado) Instituto Militar de Engenharia.

BÄHR, H. P. (1991). *Confeccion de Imagenes Rectificadas: algoritmos e instrumentos*. Papers, In Digital Photogrammetric System, Eds Ebner.

BÄHR, H. P. WIESEL, J. K. (1991). *Cost – Benefit analysis of Digital Orthofoto Technology*. Papers, In Digital Photogrammetric System, Eds Ebner, p. 59-73.

BLACHUT, T. (1985). *Cadastre for Developing Countries Based on Orthofoto Techiniques*. The Canadiar Surveyor, Volume 39, p. 31-43.

BONIFACE, P. R. J. (1992). *PR²SM – Softcopy Production of Orthofotos and DEM*, Photogrammetric Enginering & Remote Sensing, Volume 58, nº 1, Colorado, USA.

BOULDER, F. L. (1992). *Digital Photogrammetric Systems*. Papers, In Digital Photogrammetric Systems, Eds Ebner, p. 91-94.

BOULDER, F. L. (1991). *Digital Photogrammetric Systems*. Papers, In Digital Photogrammetric Systems, Eds Ebner.

CHAVES, ELIANA EDÉRLE DIAS (1998). *Análise da Qualidade de Dados Georeferenciados utilizando a Tecnologia GPS*. São Carlos. 179p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

DOYLE, FREDERICK J. (1968). *The Relative Merits of Electronic and Optical Techniques of Producing Orthophotographs*. Papers, Canadian Surveyor.

EUROPEAN ORGANIZATION FOR EXPERIMENTAL PHOTOGRAMMETRIC RESEARCH. (1999). Practical Aspectos of Digital Orthophoto Production. Marné La Vallée. Editor O Koelbi, N° 37.

HELAVA ASSOCIATES INCORPORATED DIGITAL SCANNING WORKSTATION USER'S MANUAL. (1994). Version 1.32, March 1 st.

GONÇALVES, LUIZ M. GARCIA E FERNANDES, ANTÔNIO ALBERTO. (1996). *Modelagem de Terrenos com Triangulação CFK Adaptativa*. Anais do IX SIBGRAPI. Pág.337-338.

GUEDES, ANDRÉ LUIZ PIRES. (2001). *Introdução à Geometria Computacional*. Technical Report RT-DINF 002/2001, Departamento de Informática – UFPR.

HELAVA ASSOCIATES INCORPORATED DIGITAL PHOTOGRAMMETRIC WORKSTATION USER'S MANUAL. (1994). Version 2.2, June 10 th.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. (2001). *Global Positioning System: Theory and Practice*. 4ª Edição. Springer WienNew York. Austria.

INSTITUT FUR PHOTOGRAMMETRIE – UNIVERSITAT BONN FIRST COURSE IN DIGITAL PHOTOGRAMMETRY. (1992). Landesvermessungsamt, NRW, Bonn – Bad Godesberg.

KAISER, RICACHARD; MADANI, MOUSTAFA. (1992). *A Digital Orthophoto System from Intergraph*.

KEATING, T.J. (1979). *Digital Orthophoto Production Using Scanning Microdensitometers*. Article, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Volume 1, nº 6, p. 735-740.

KRAUS, KARL. (1993). *Photogrammetry. Fundamentals and Standard Processes*. Volume 1, Ferd. Dümmler^s Verlag. Bonn.

KRAUS, KARL. (1993). *Photogrammetr. Fundamentals and Standard Processes*, Volume 2, Ferd. Dümmler^s Verlag. Bonn.

LEICK, ALFRED. (1995). *GPS Satellite Surveying*, 2ª edição, A Wiley-Interscience Publication, John Willey & Sons, INC. New York, Chichester, Toronto, Brisbane, Singapore.

LOCH, C., FILHO, SALLES. (1989). *Cadastro Técnico Multifinalitário Rural e Urbano*. UFSC, Florianópolis – SC.

LOCH, RUTH E. N. (1987). *Ortofotocarta: produção e aplicações*, XIII Congresso Brasileiro de Cartografia, Anais, Brasília.

MUNICH, G. (1991). *Digital Orthoprojection: Scanning, Handling and Processing of Aerial Images I*. Papers, In Digital Photogrammetric Systems, Eds Ebner.

NOVAK, KURT. (1992). *Rectification of Digital Imagery*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Volume 58, nº 3, p. 339-344, Ohio, Columbus.

PARKINSON, BRADFORD W.; JR, JAMES J. SPILKER. (1996). *Global Positioning System: Theory and Applications*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Volume I e II, Stanford University, California, Estados Unidos da América.

SATO, SIMONE SAYURI. (1996). *Aplicação e Análise da Ortofoto Digital na Definição de Limites de Propriedades Imobiliárias – Estudo de Caso: Imóveis da Universidade Federal de Santa Catarina*. Dissertação (Mestrado). Florianópolis – SC.

SCHENK, TONI. (1999). *Digital Photogrammetry*. Terra Science, Volume I.

SEGANTINE, P.C.L. (1995). *Estabelecimento e ajuste de uma rede geodésica no estado de São Paulo, com o Sistema de Posicionamento NAVSTAR/GPS*. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

TAVARES, P. E. M. E FAGUNDES. P. M. (1991). *Fotogrametria*. Sociedade Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro – RJ.

TORGE, WOLFGANGE. (1991). *Geodesy*. Walter de Gruyter, Berlin, 2ª edição, New York, USA.

THORPE, JOHN. (1993). *Aerial Photogrammetric: State of the Industry in the US*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Volume 59, nº 11, p.1599-1604.

WELLS, DAVID. (1986). *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates. Ottawa, Ontario, Canadá.

WIESEL, J. K. (1991). *La Confecção de ortofotos digitais*. Papers, In Digital Photogrammetric System, Eds Ebner.

WOLF, PAUL R. (1974). *Elements of Photogrammetry*. McGraw-Hill, New York, USA.

2- SITES CONSULTADOS

<http://www.turma-aguia.com/davi/gps/historico.htm>, dia 04/12/01

<http://www.turma-aguia.com/davi/gps/caracteristicas.htm>, dia 04/12/01

<http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/mnt/mnt.htm>, dia 16/12/02

<http://www.inf.ufpr.br/cgi-bin/bibsearch?author=guedes>, dia 19/12/02

<http://www.concar.ibge.gov.br/>, dia 23/12/02